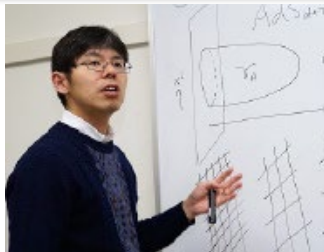


学術変革(A) 極限宇宙
量子情報で拓く時空と
物質の新しいパラダイム

実験と理論の協奏 2023年5月17日
固体物質系～量子・冷却気体系

Special thanks to
高柳匡



物質・材料研究機構
間野高明

核スピンや励起子による量子ホール系の探索と エッジで創る時空

東北大学理学研究科・物理専攻 遊佐 剛

科研費
KAKENHI

学術変革(A) 21H05188,
基盤(S) 19H05603
21F21016, 21J14386,

堀田昌寛
柴田尚和
神山晃範
J. N. Moore
松浦雅弘



名古屋大学
南部 保貞



九州大学
山本 一博
杉山 祐紀

研究室レベルの実験で、トイモデルとして 量子宇宙を実現できるか？

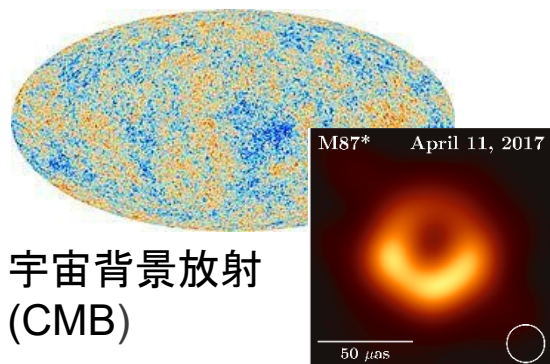
量子宇宙:

(量子力学と重力に支配される)
時間ゼロの極限的に小さな宇宙、
量子ブラックホール

トイモデル:

トイ模型、おもちゃ、システムを設計
して、パラメーターを制御できる。

天文学的観測



宇宙背景放射
(CMB)

Event horizon
telescope (EHT)

高エネルギー加速器



LHC(Large Hadron
Collider)@CERN

研究室レベルの実験



Our lab...

C02班: 量子ホール系による量子宇宙の実験

量子宇宙のトイモデルを量子ホールエッジで実現

- (1) 量子測定技術の確立、量子宇宙の実験
- (2) 多方面の理論から量子宇宙の検証

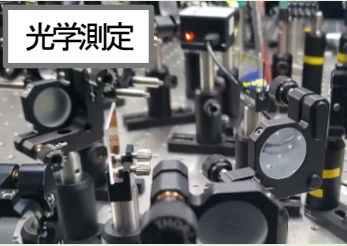
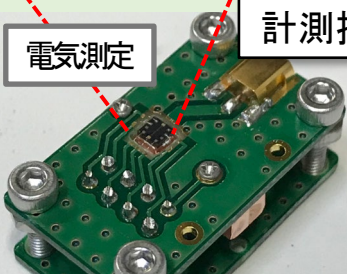
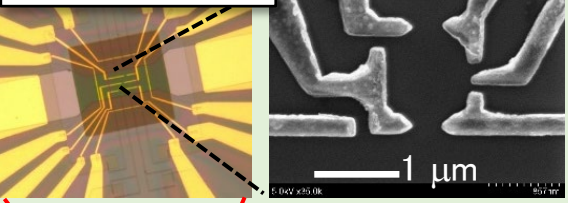
物性実験

遊佐剛
物性実験



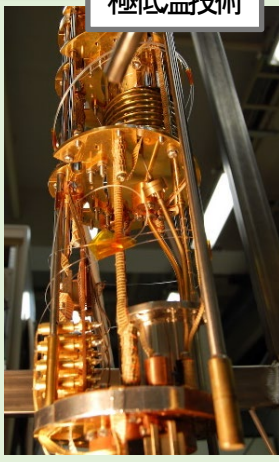
研究協力: 材料科学
(Weizmann研、
物材機構)

半導体ナノテク



計測技術

極低温技術



量子宇宙理論と強力な連携
C01班: ゲージ重力対応
C03班: ブレーンワールド

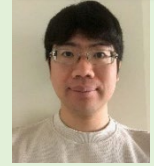
量子多体系、厳密数値計算



柴田尚和
物性理論



トポロジー、アノマリ



米倉和也
数理物理
(素粒子論)

$$S = \frac{k}{4\pi} \int A \wedge dA$$

E02班 宇宙論



名古屋大学
南部 保貞



九州大学
山本 一博
杉山 祐紀

相対論的量子情報



堀田昌寛
量子情報
(素粒子論)



今回の話の趣旨:

実験でどんなことができるのか皆さんと共有したい

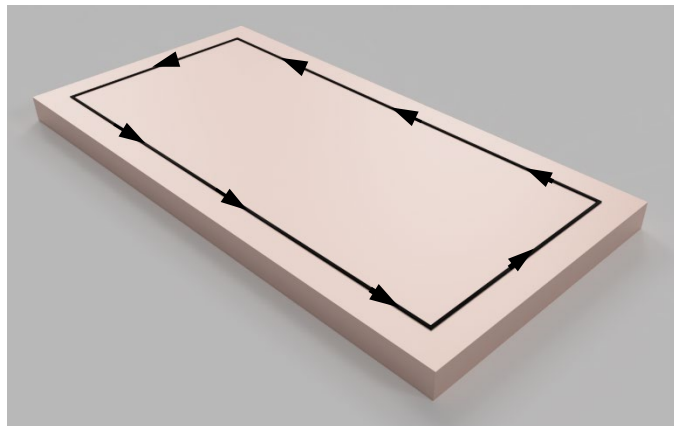
抵抗、光による
核スピン検出

$$I = \frac{3}{2}$$

励起子を使った
量子ホール系の可視化
(光学系)

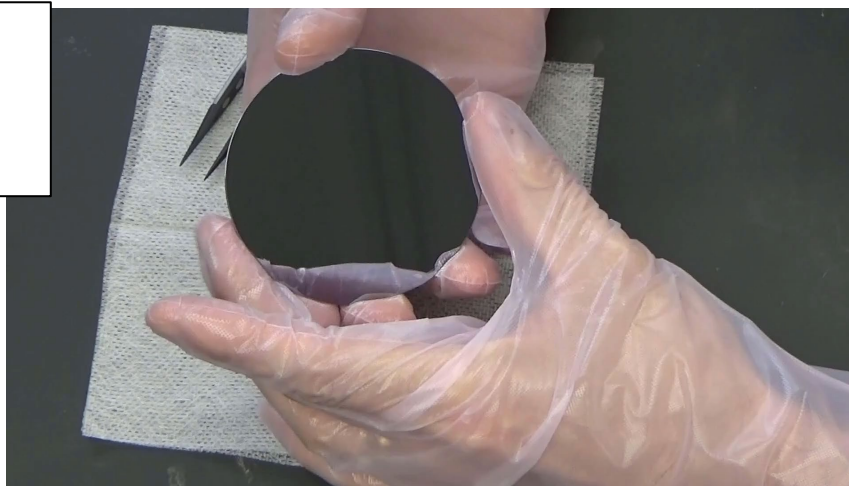
量子ホール系で
創る量子宇宙

量子ホール系

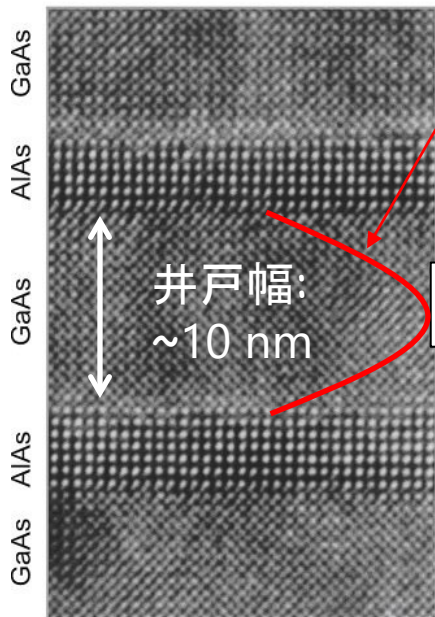


半導体量子井戸構造 (2次元電子)

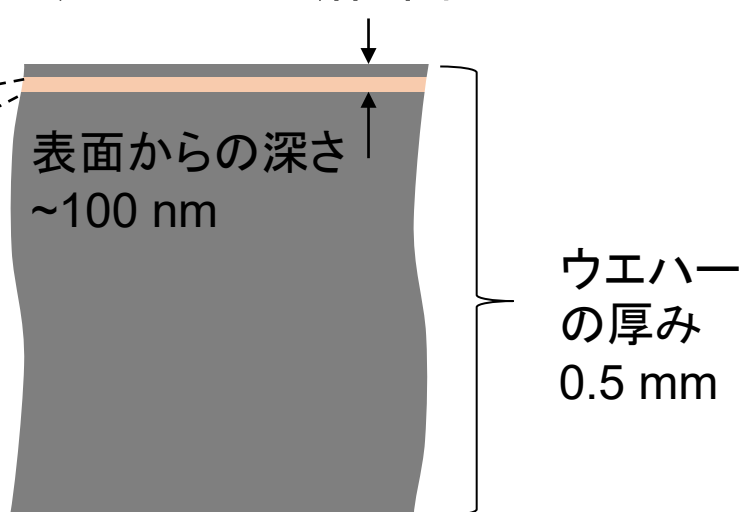
ガリウムヒ素
(GaAs/AlGaAs)
ウエハー



断面TEM像
(電子顕微鏡)



ウエハーの断面図



半導体プロセス

レジスト(エッチングから保護するパターン)

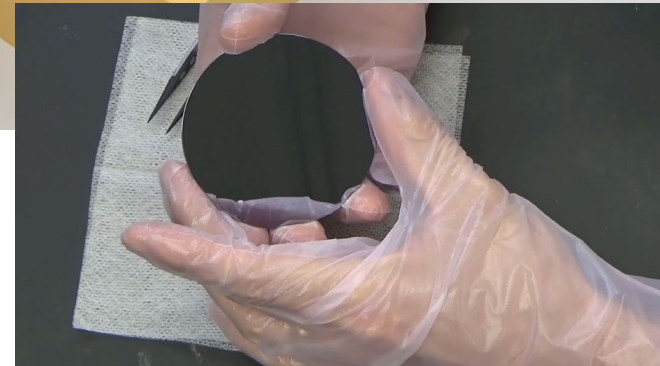
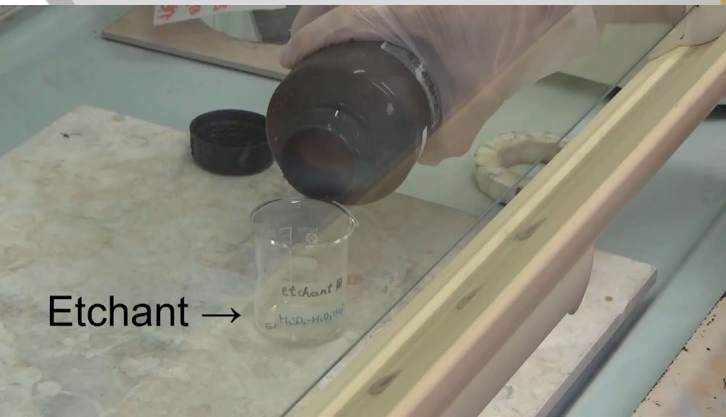
電極

1mm角程度の
半導体デバイス
(スケールは実際と異なる)

量子井戸の中の
二次元電子

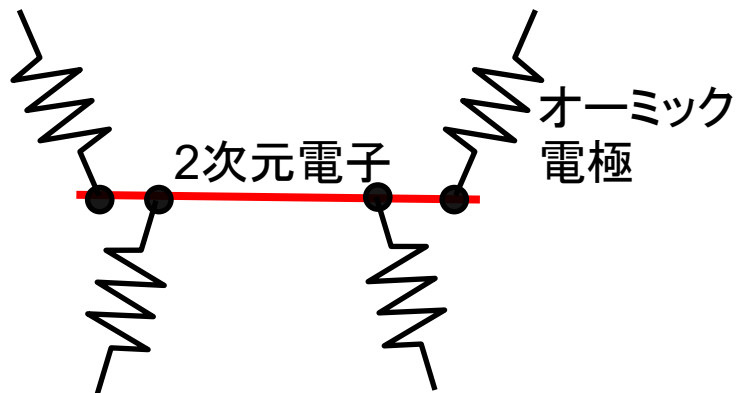
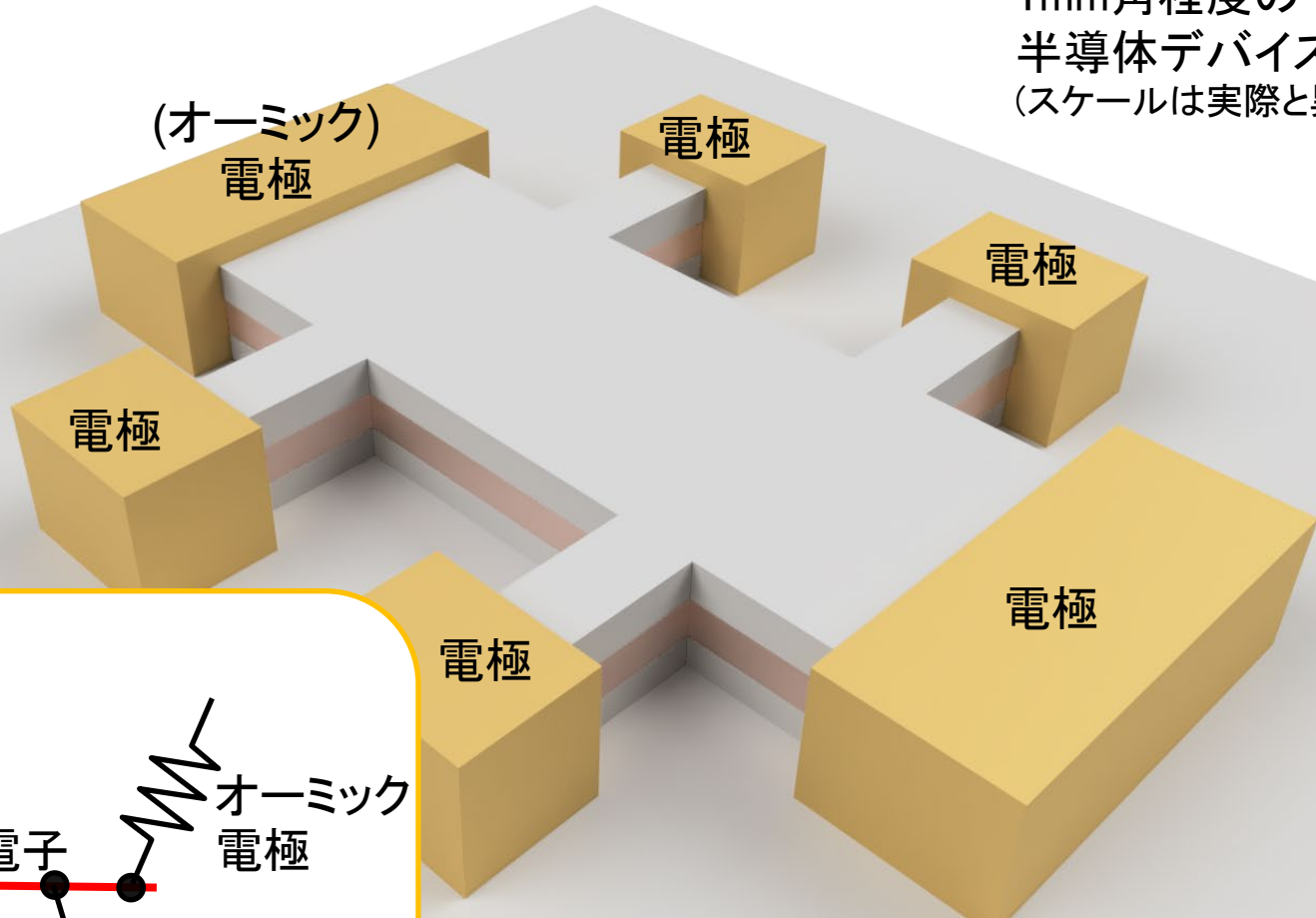
電極

液体によるエッチング

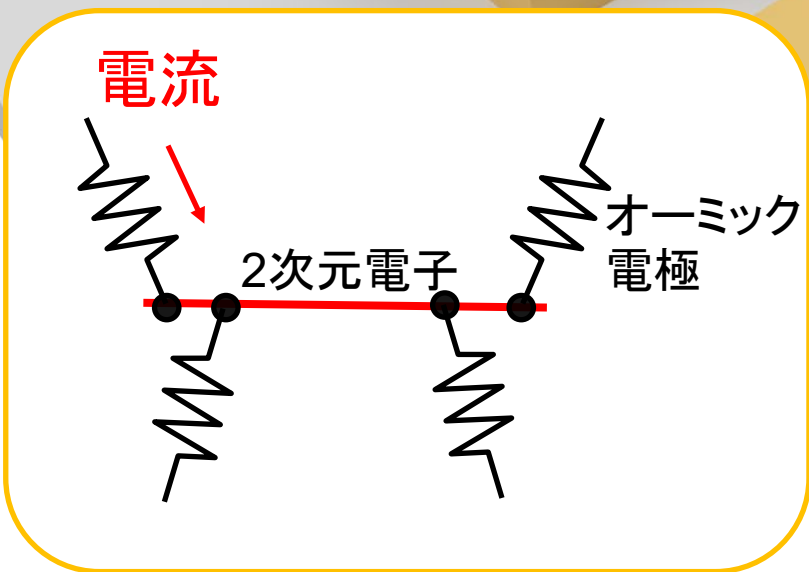
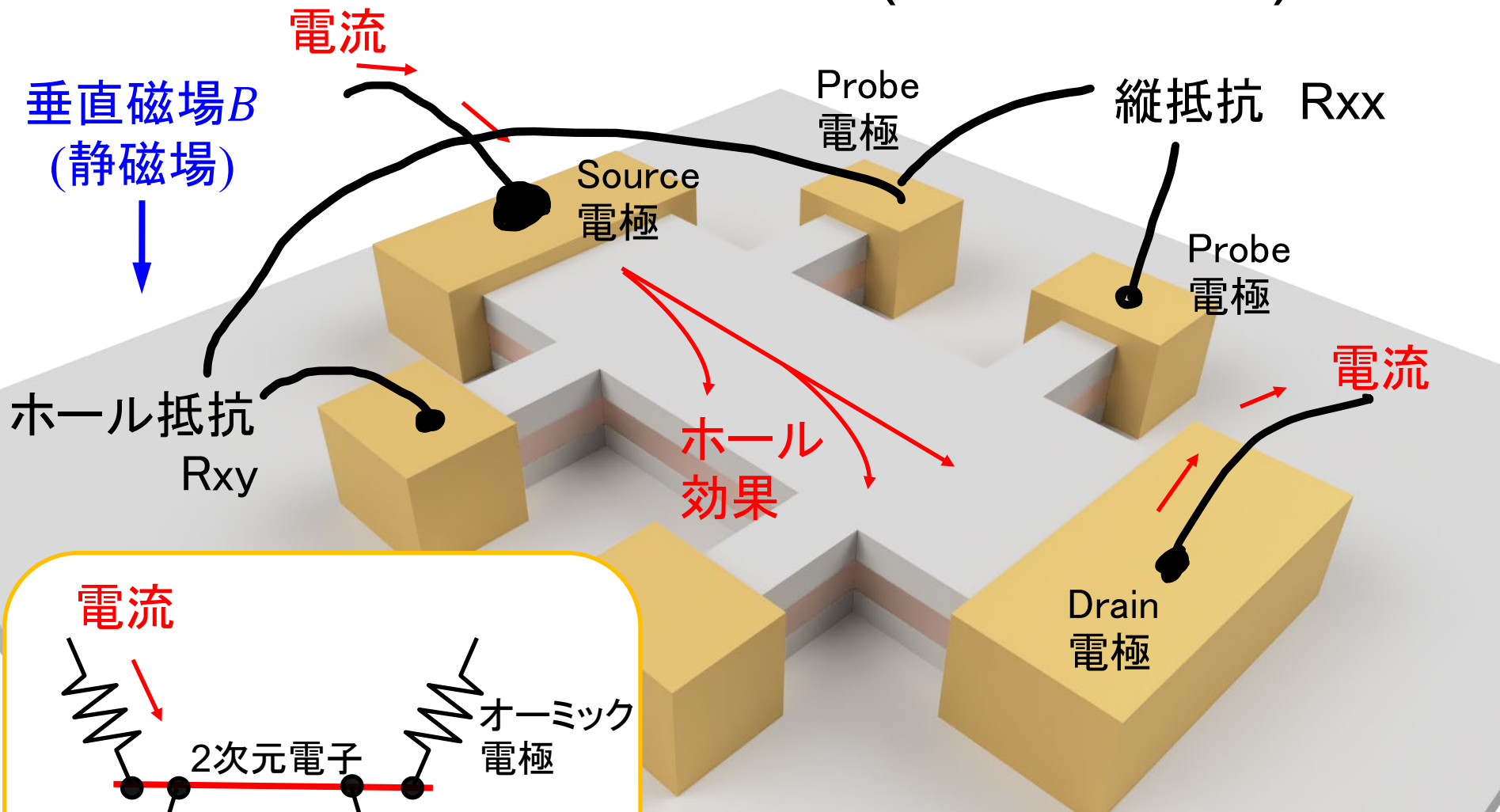


半導体プロセス

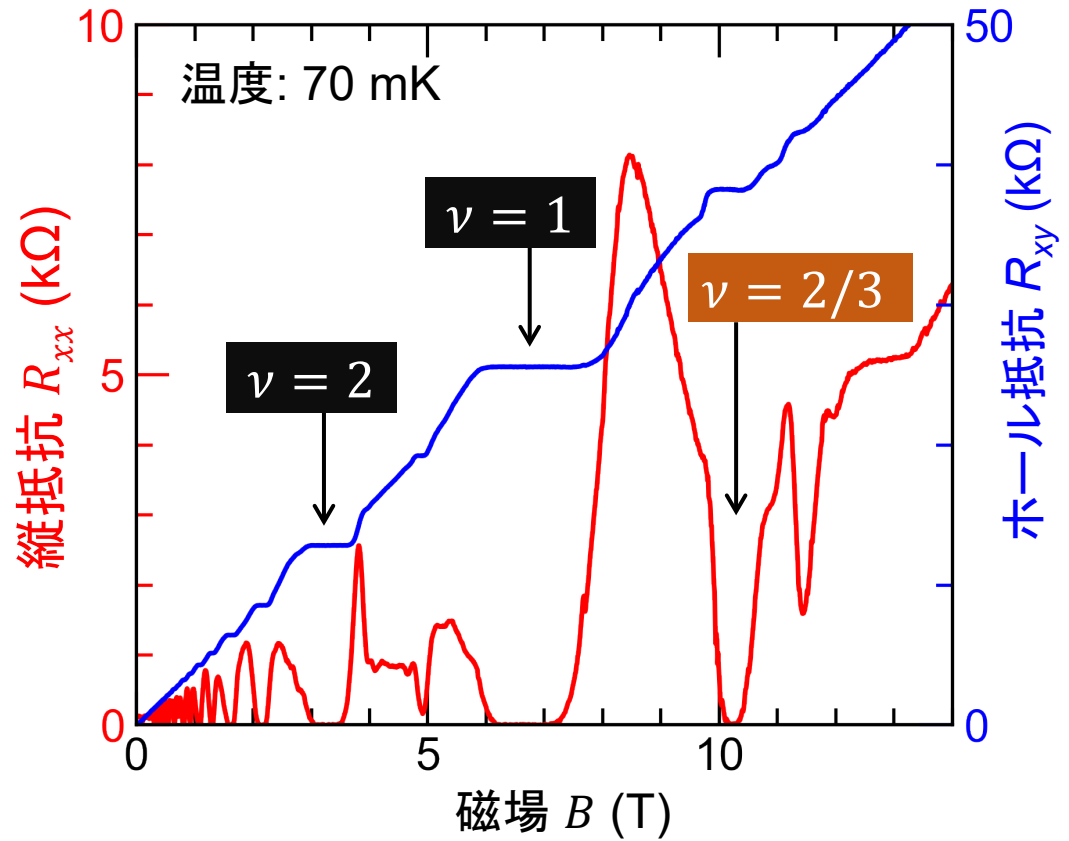
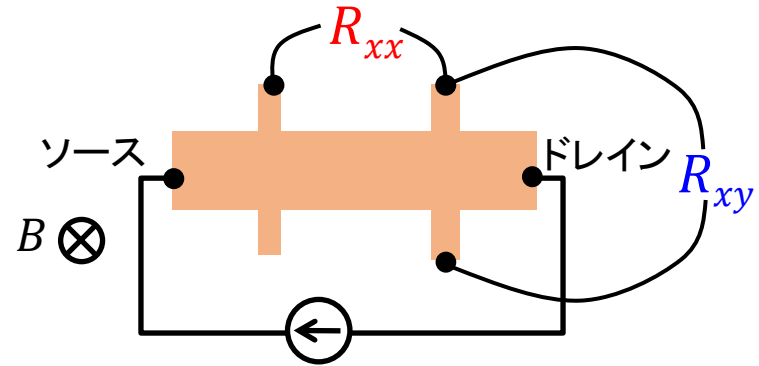
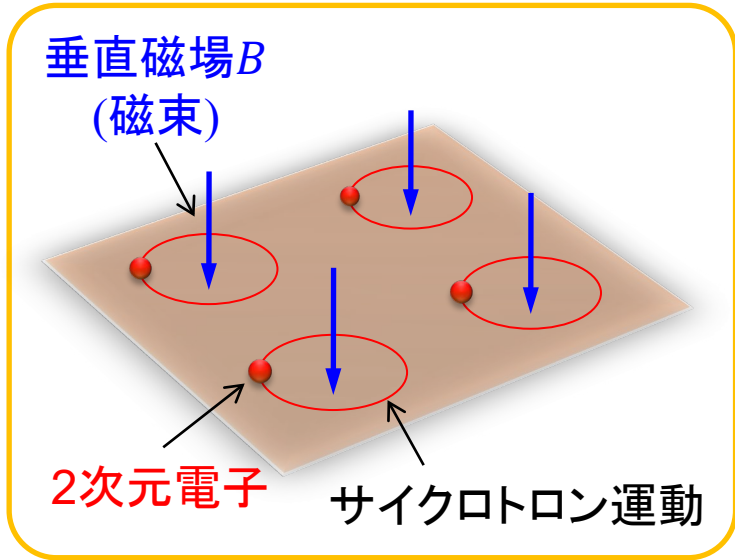
1mm角程度の
半導体デバイス
(スケールは実際と異なる)



測定手法：電気測定(ホール測定)



量子ホール効果



ランダウレベル占有率

$$\nu = \frac{n_e \leftarrow \text{電子密度}}{n_\phi \leftarrow \text{磁束密度}}$$

$\nu = \text{整数}$

→ 整数量子ホール効果

$\nu = \text{分数}$

→ 分数量子ホール効果

縦抵抗 R_{xx} → ゼロ

ホール抵抗 R_{xy} → 量子化

バルクとエッジ

試料端近傍を上から見た図

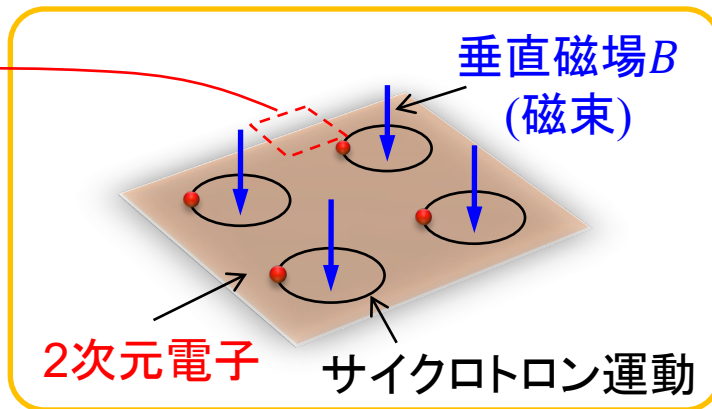


“試料端”では量子化条件が壊れる。

エッジ 金属的

試料端から離れた場所

バルク 絶縁体



ラッティンジャー液体として記述可

• 分散関係の2階微分がゼロ → 質量ゼロ (カイラル)

→ 1次元カイラルmassless boson (ゼロ質量場)

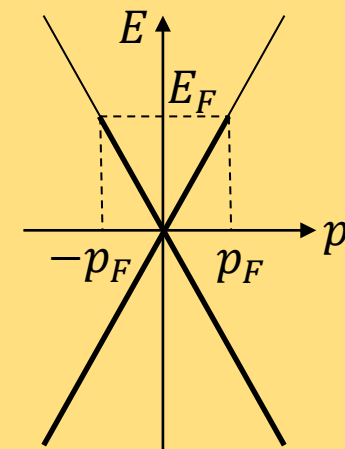
場の理論では、

「質量ゼロのボソンは**光速で真空を伝搬**する」

エッジの励起は、真空を伝搬する光と等価

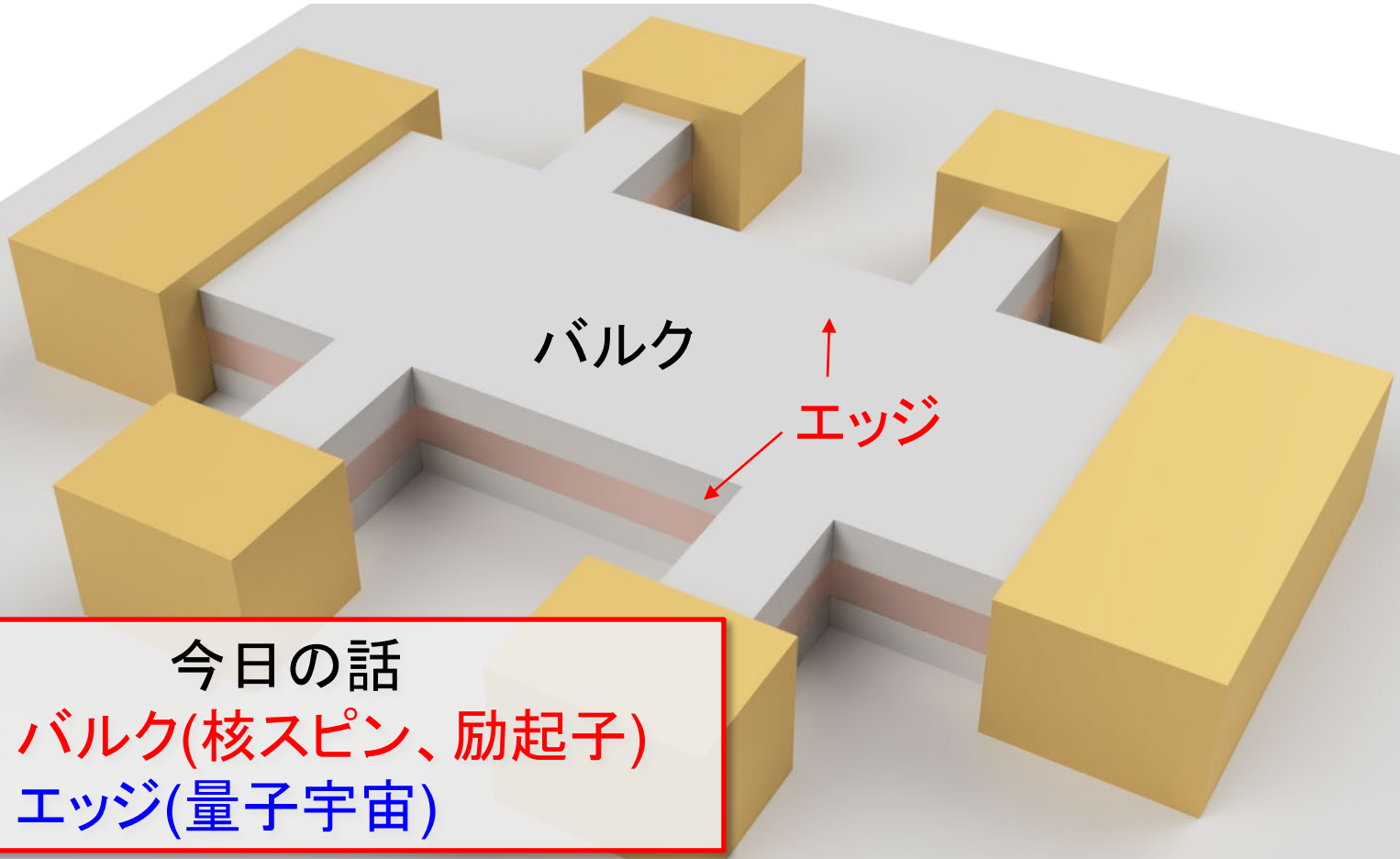
実験的にはギャップのない励起が**減衰せずに長距離を伝搬**

ラッティンジャー
模型の分散関係



Luttinger (1963)

バルクとエッジ



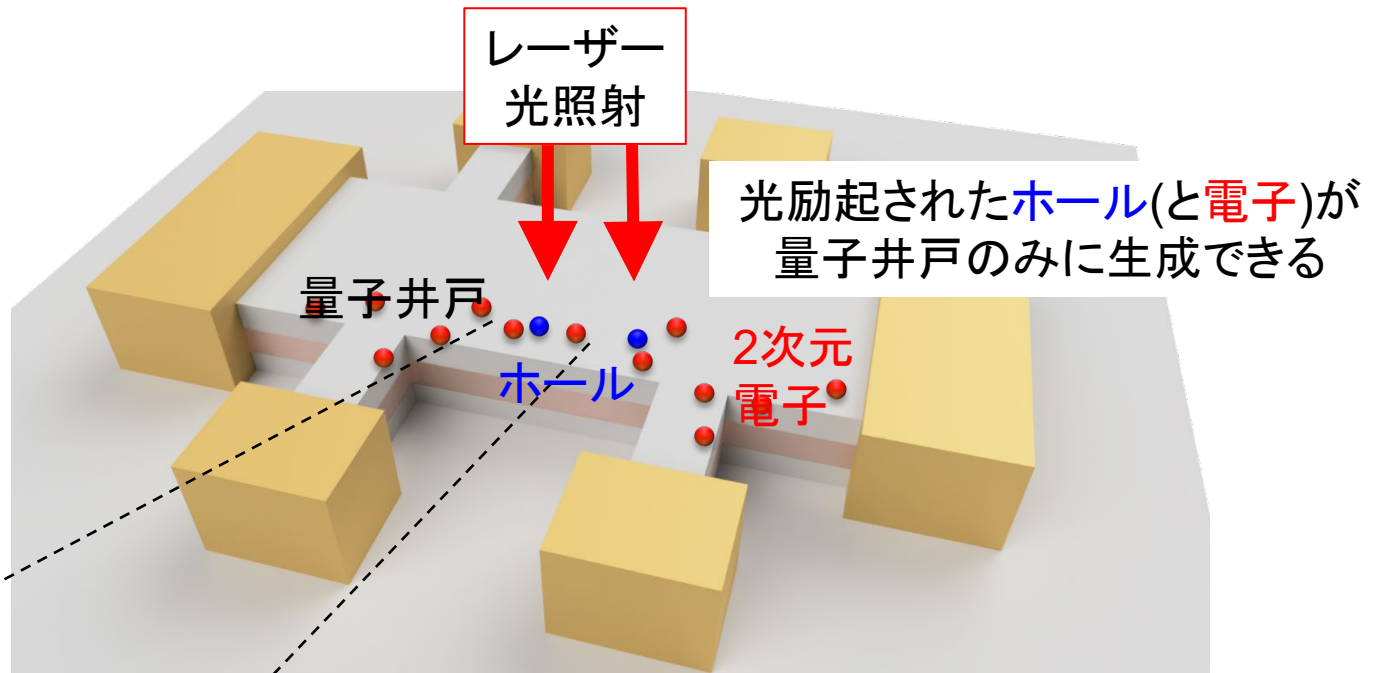
今日の話

前半: **バルク**(核スピン、励起子)

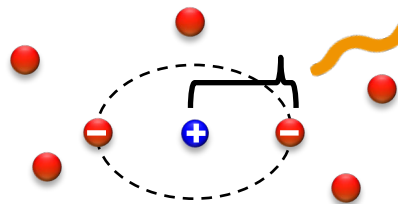
後半: **エッジ**(量子宇宙)

量子ホール系はバルクがエッジで守られたトポロジカル物質

測定手法：光学測定/分光測定



荷電励起子 (Trion)
(人工水素イオン)



基底状態
(寿命~100ps)

再結合して光を放出

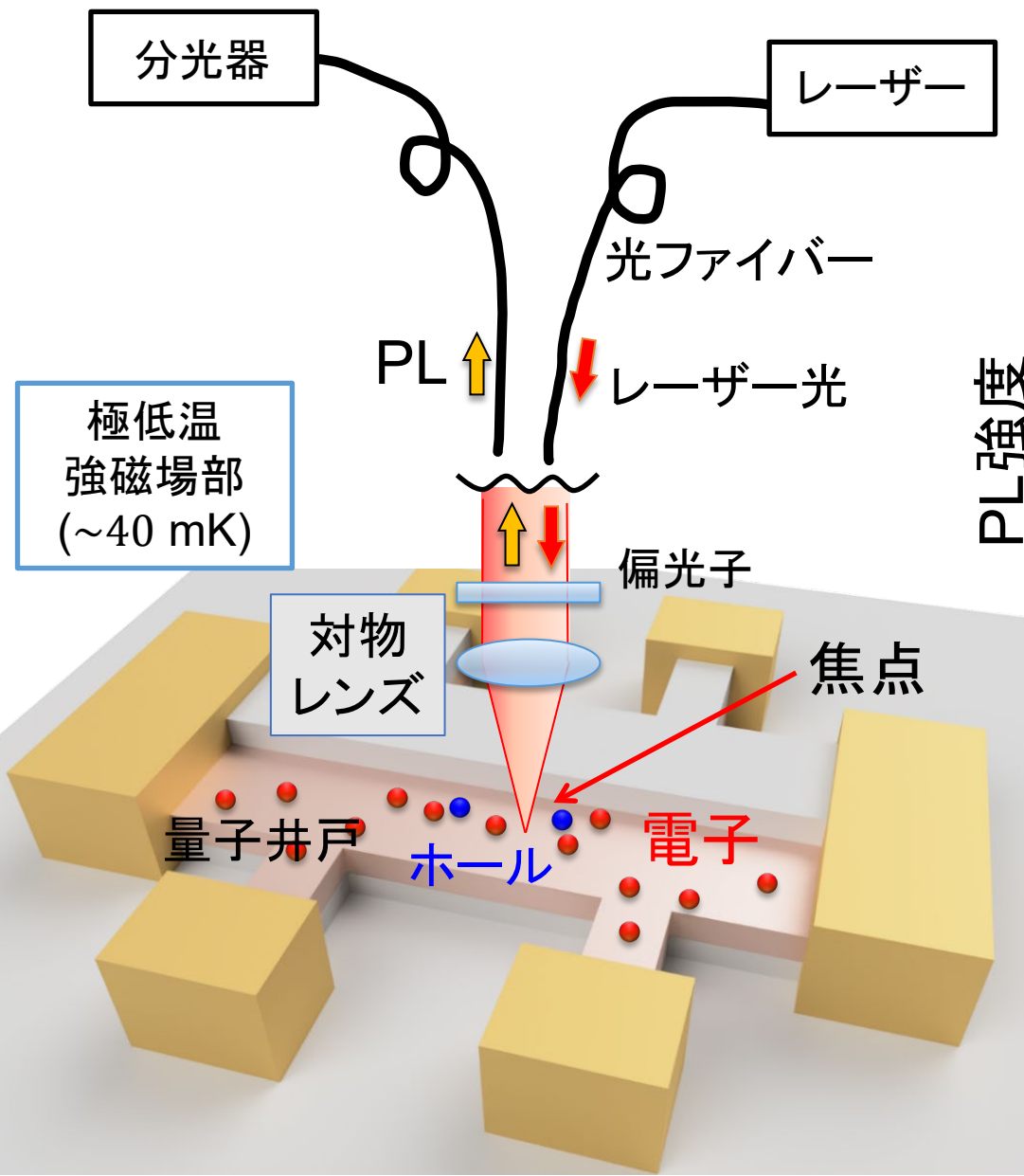
フォトルミネッセンス (PL)

- ・強度(電子密度、相互作用)
 - ・エネルギー(状態)
 - ・偏光(電子スピン)
- などの情報を含む

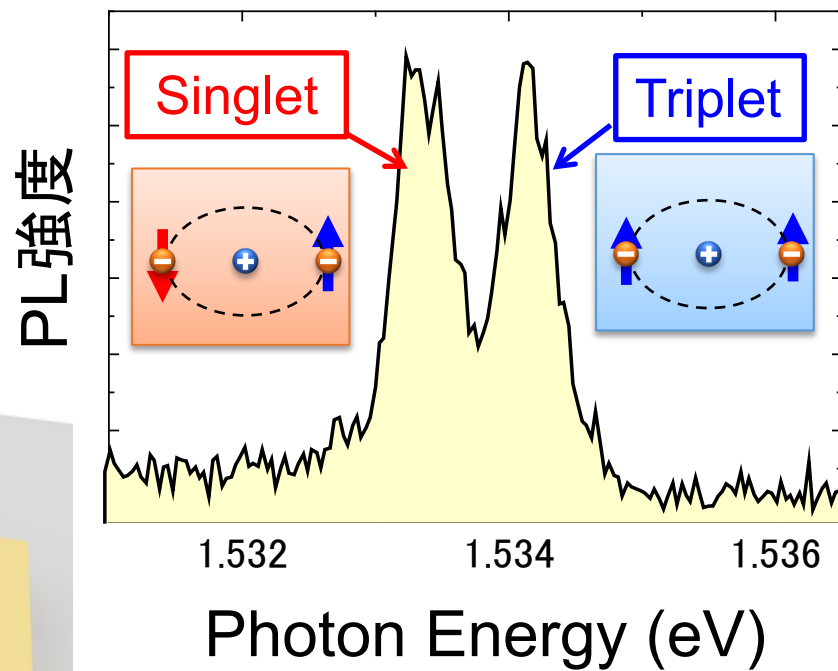
(参) 有機EL
(エレクトロルミネッセンス)

PLで量子ホール系を探索できる

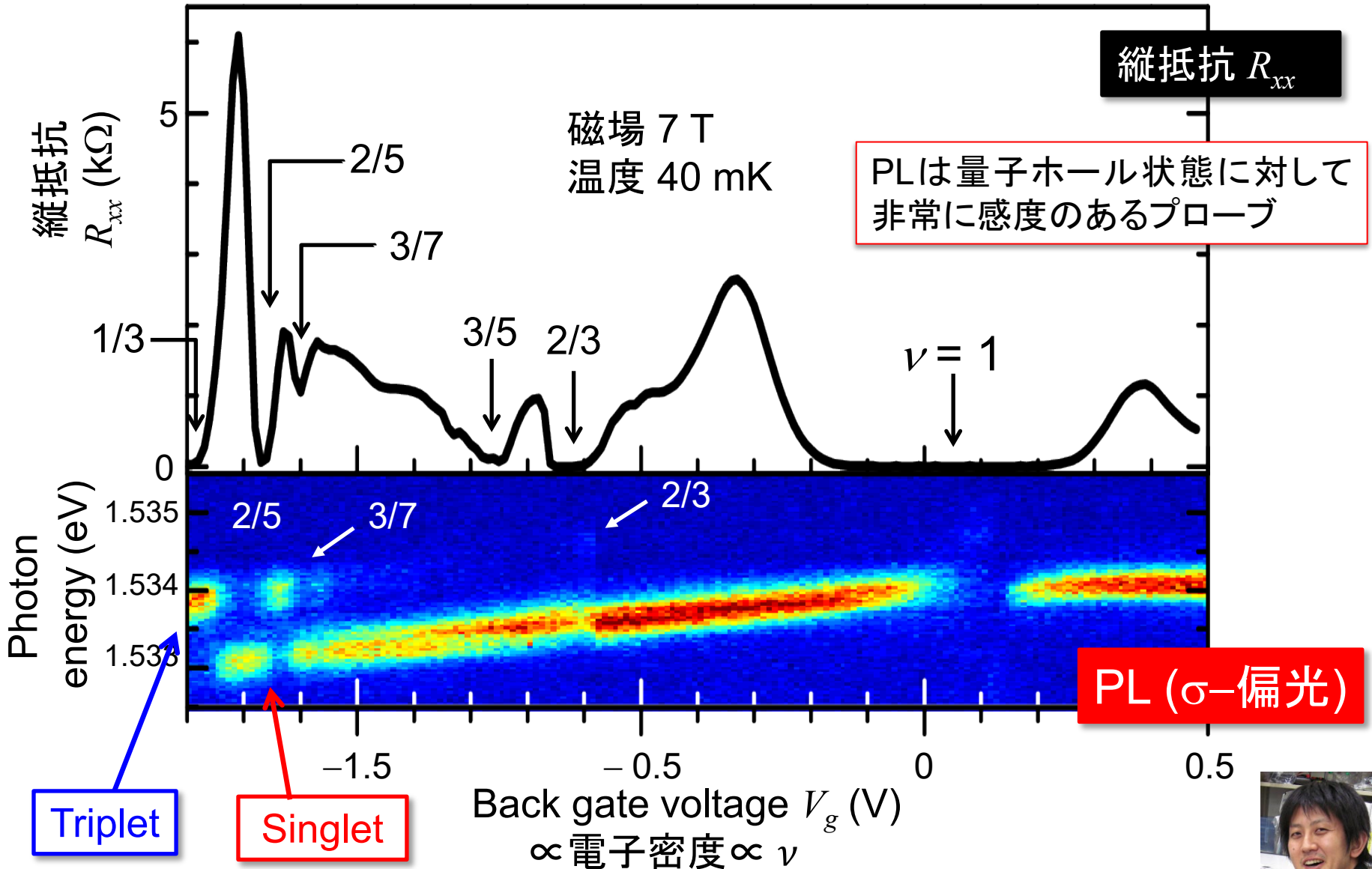
顕微PL測定



典型的な顕微PL
磁場: 7 T, 温度: 40 mK, 偏光: σ^-



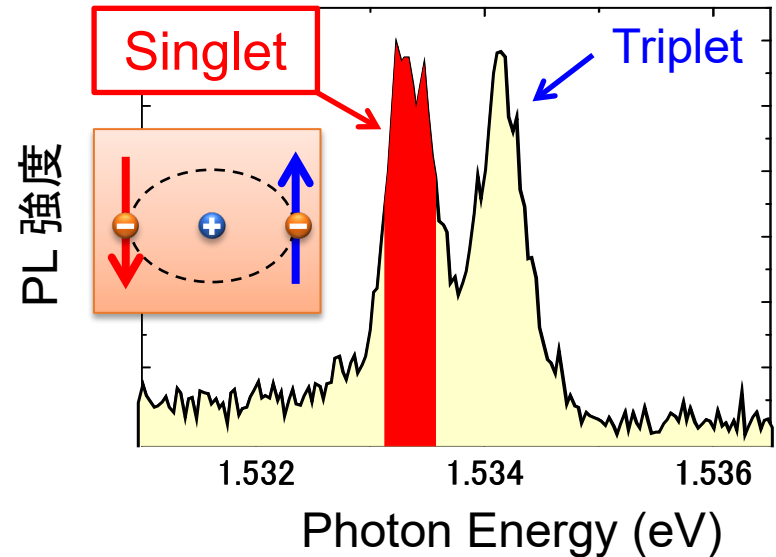
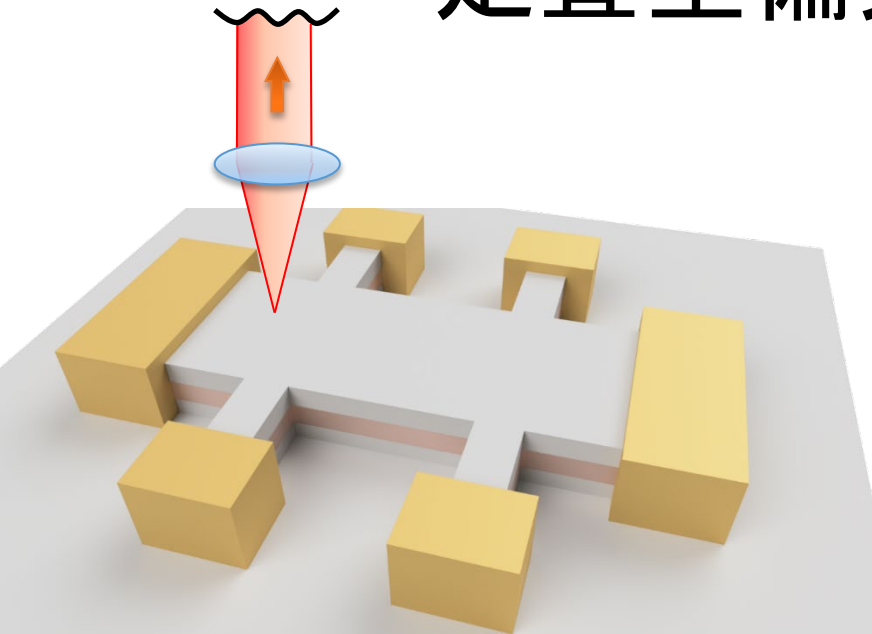
典型的な顕微PLスペクトル(V_g 依存性)



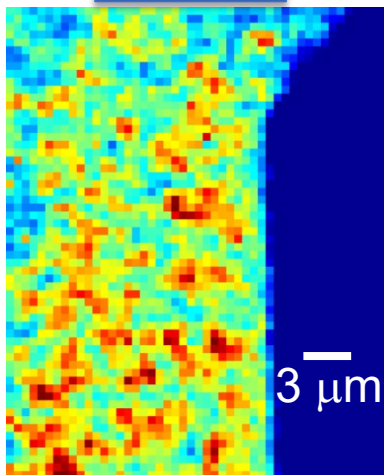
走査型偏光分光顕微鏡

典型的な顕微PL

磁場: 7 T, 温度: 40 mK, 偏光: σ^-



$\nu \sim 2/5$



xy方向にスキャンしてPLを測定

PL積分強度の空間マッピング

→分数量子ホール状態($\nu \sim 2/5$)の
発現過程の可視化

$$\nu = 2/3$$

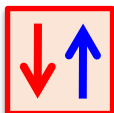
$\nu = 2/3$ 分数量子ホール状態の 相転移の直接観測

$\nu = 2/3$ 分数状態は**非磁性相**と**完全強磁性相**の基底状態が存在する。

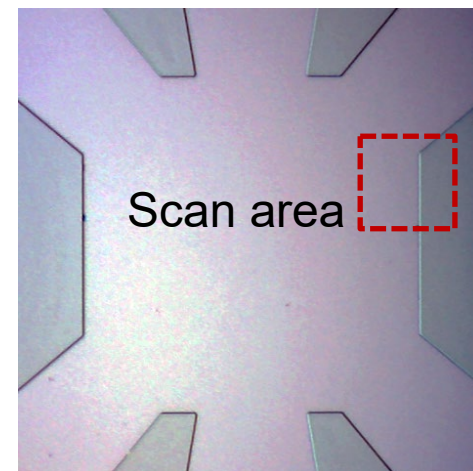
磁場: 7.5 T, 温度: 70 mK, $30 \times 30 \mu\text{m}^2$

試料の光学顕微鏡像

非磁性相

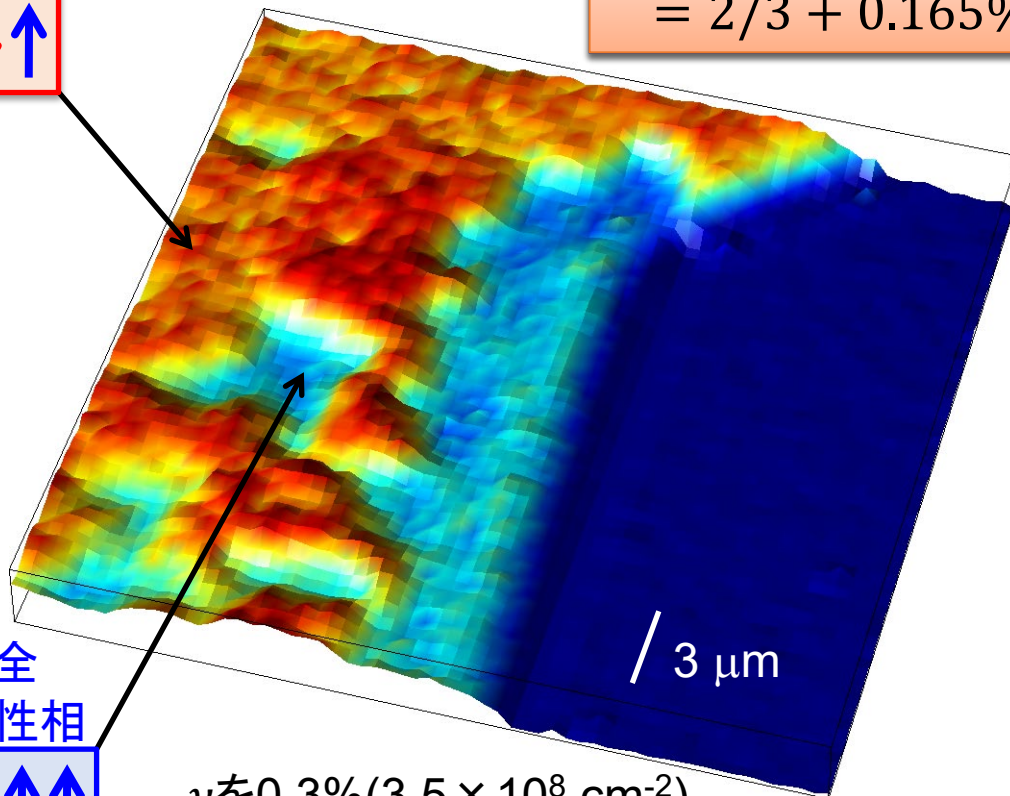


$$\nu = 0.6678$$
$$= 2/3 + 0.165\%$$

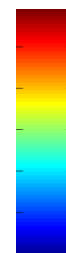


Scan area

完全
強磁性相



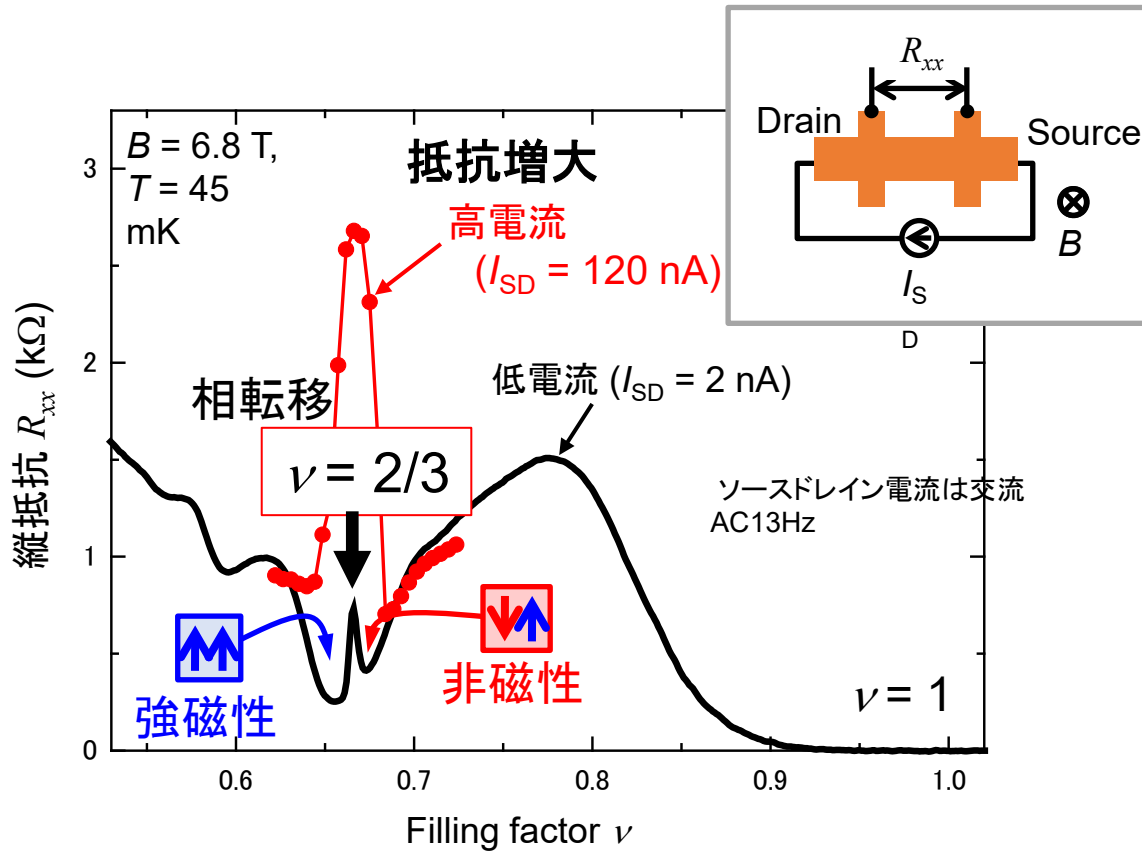
PL積分強度
(singlet)



ν を0.3% ($3.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$)
だけ増加させる



$\nu = 2/3$ 非平衡状態での抵抗増大

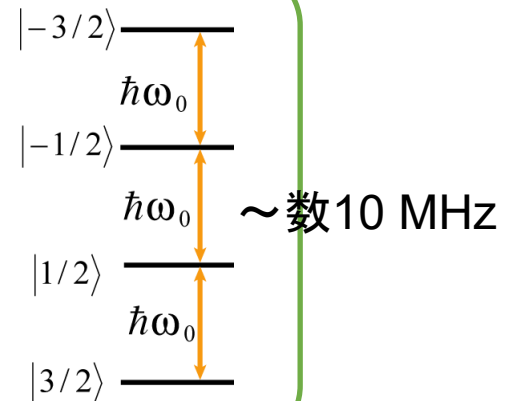


この巨大抵抗は核スピン偏極と関係があることが知られており、さまざまな研究で強力なツールとして使われてきた。

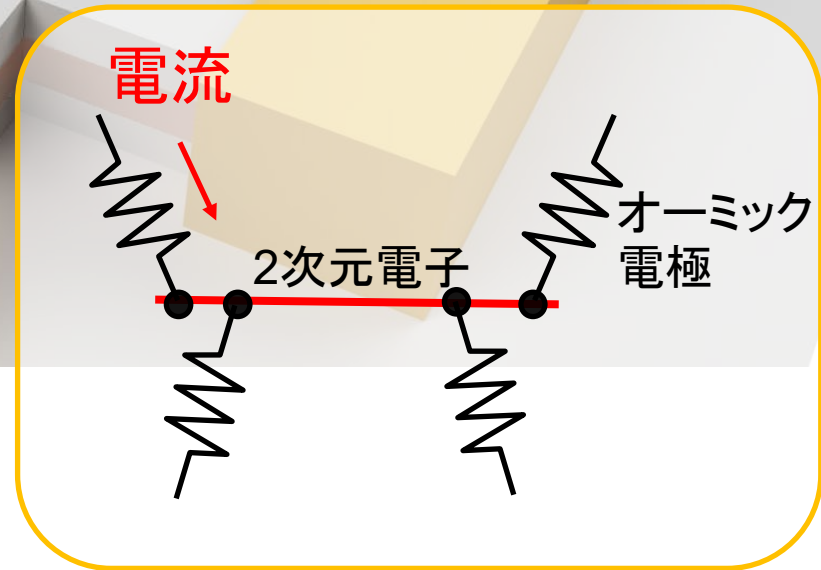
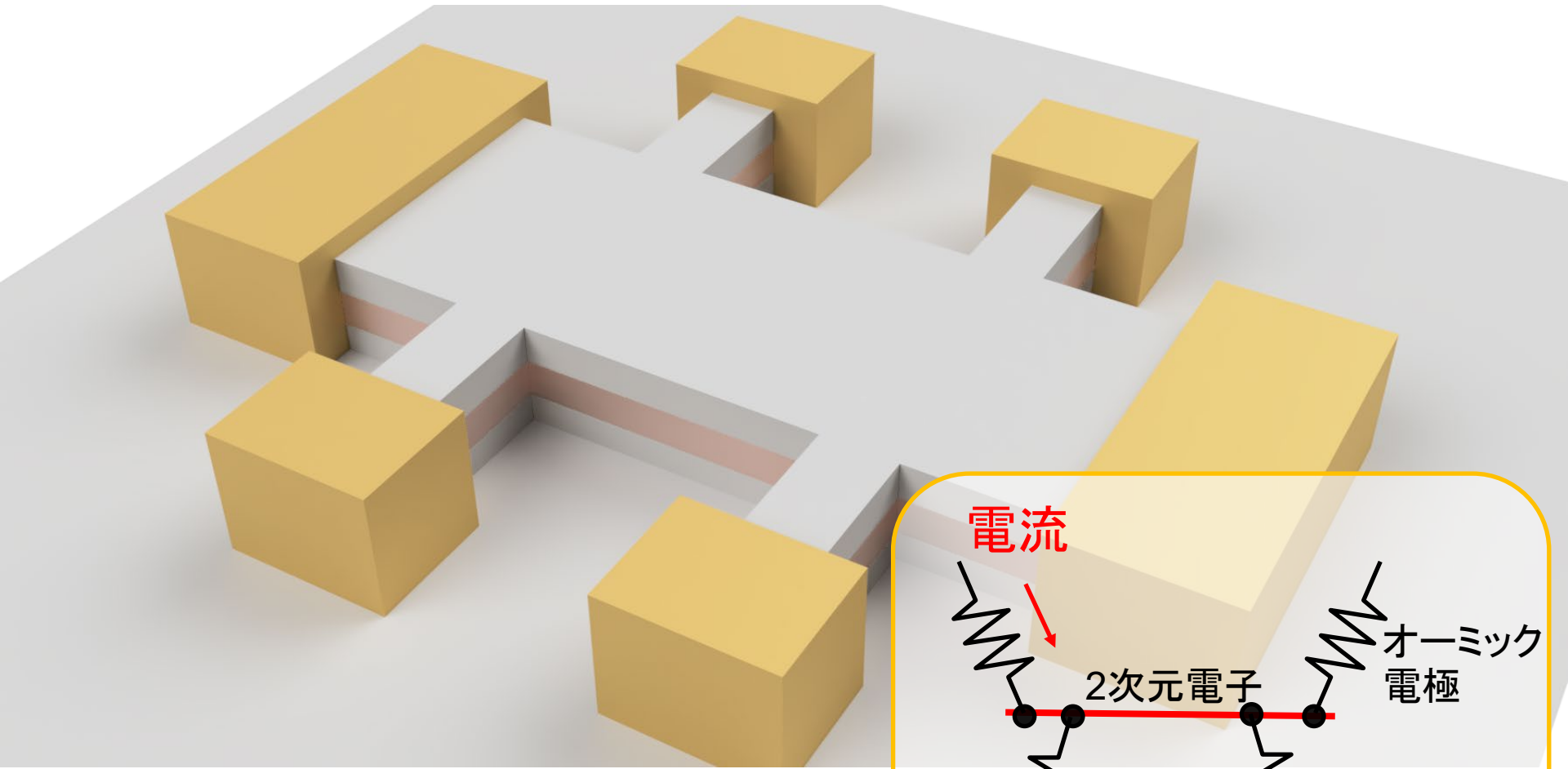
- Kronmuller et al. PRL (1998), (1999)
- J. H. Smet et al., PRL(2001), Nature(2002).
- Kraus et al., PRL (2002).
- W. Desrat et al., PRL (2002).
- Hashimoto et al. PRL (2002).
- G. Yusa et al. Nature (2005).
- N. Kumada et al., Science (2006).
- L. Tiemann et al., Science (2012),
- L. Tiemann et al., Nature Phys (2013)
- K. Akiba et al., PRL (2015)
- K. Hashimoto et al., Nature com. (2018)
- etc...

ガリウム: ^{69}Ga , ^{71}Ga , ヒ素: ^{75}As

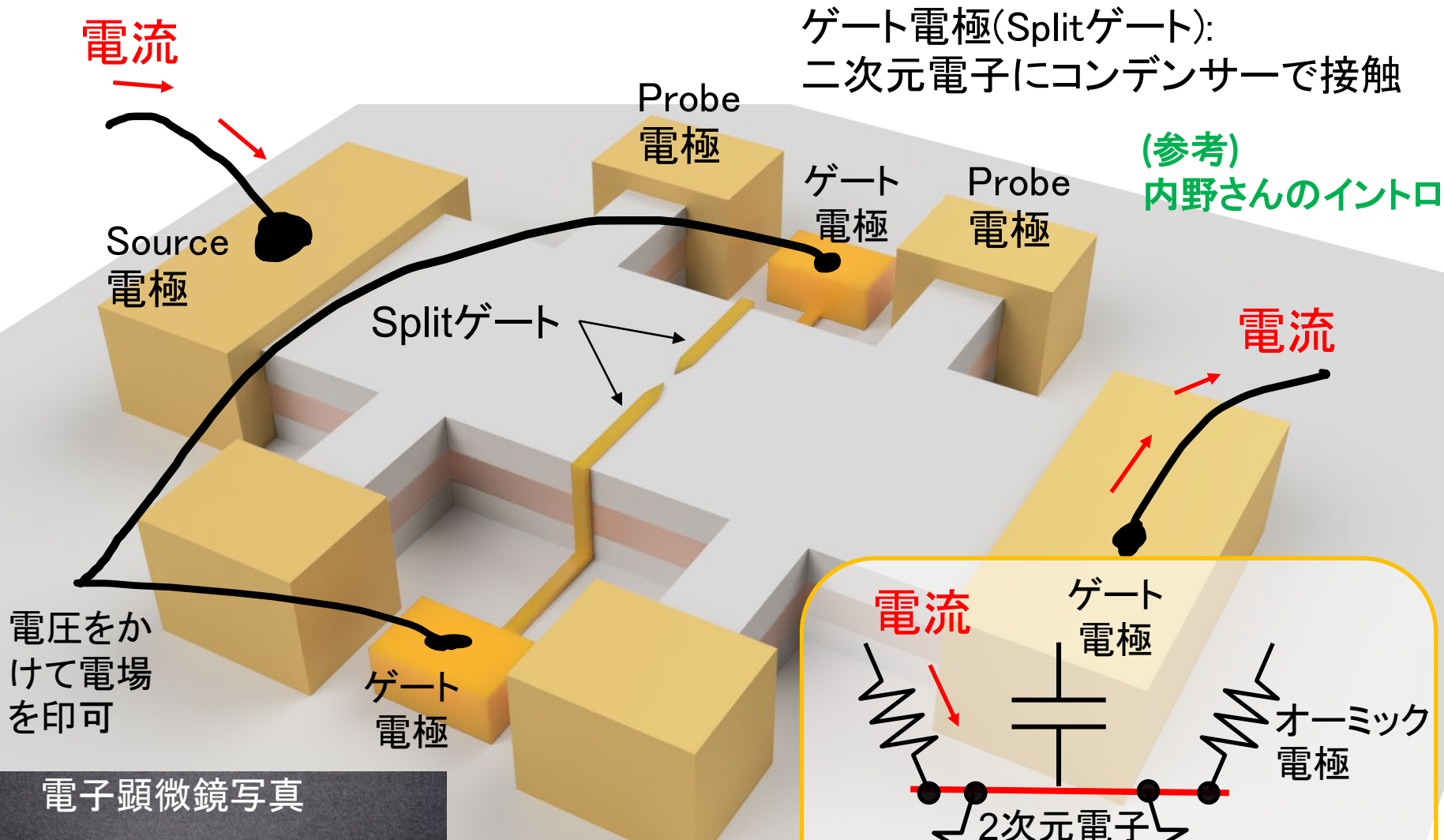
すべて核スピン $I = \frac{3}{2} \rightarrow 4$ 準位系



半導体チップ上の抵抗検出核磁気共鳴(NMR)



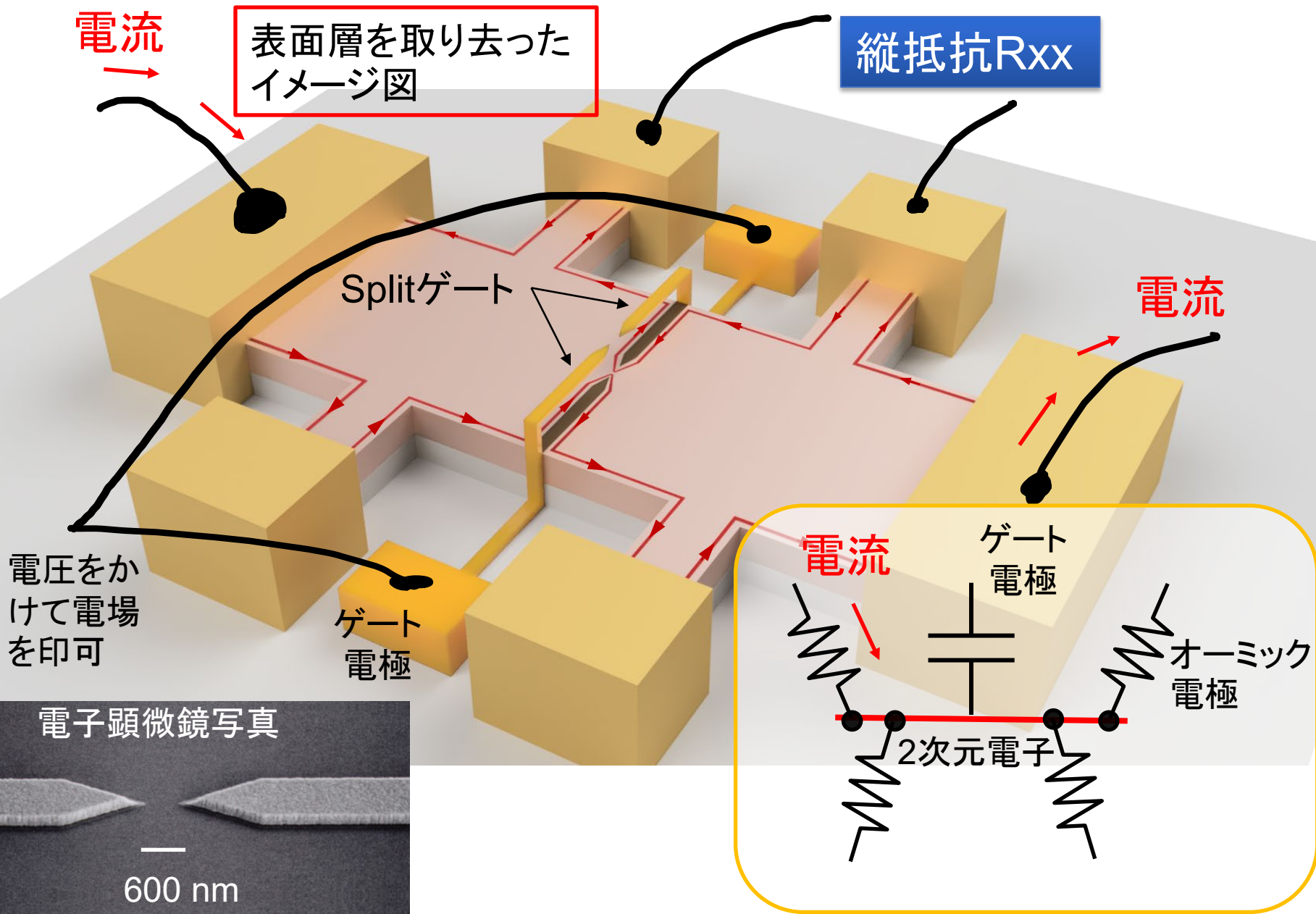
Splitゲートによるポイントコンタクト構造



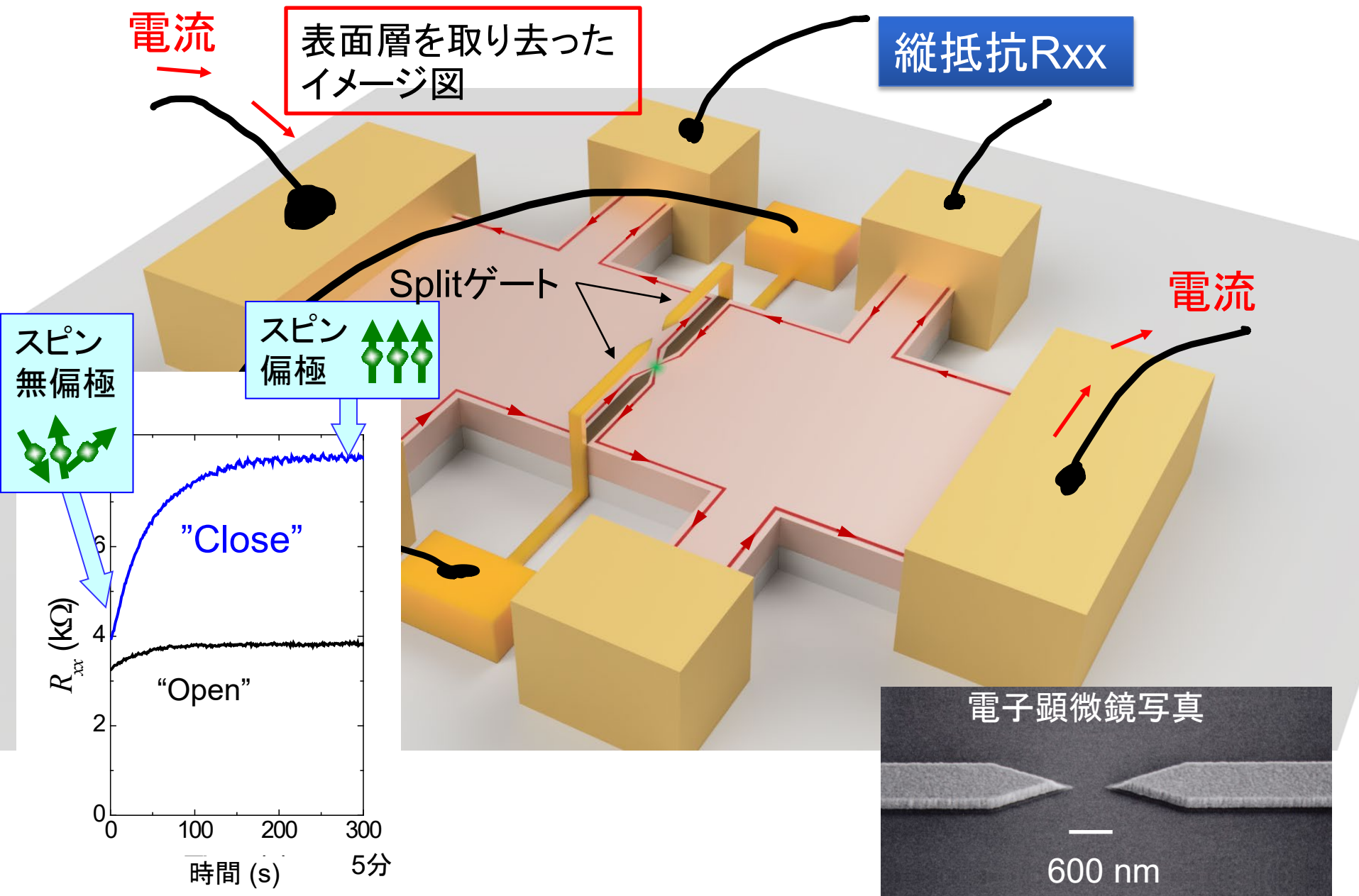
電子顕微鏡写真

600 nm

Splitゲートによるポイントコンタクト構造



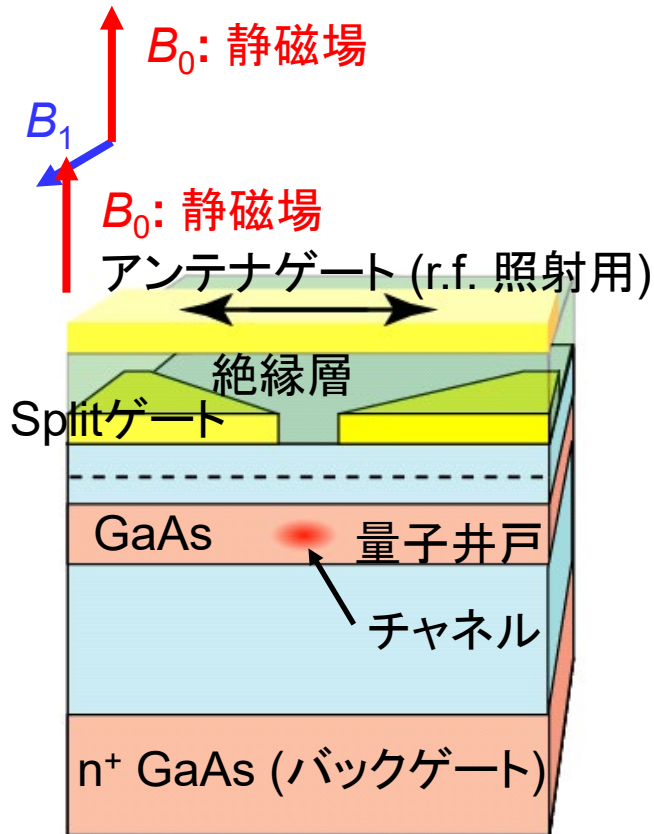
Splitゲートによるポイントコンタクト構造



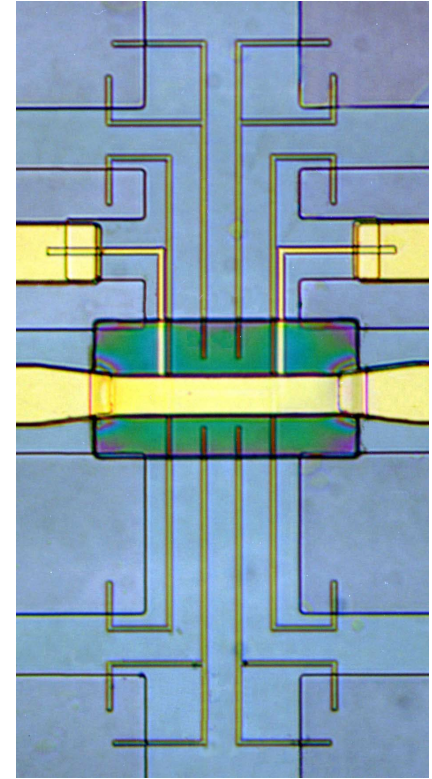
半導体チップ上の核磁気共鳴(NMR)

三つのゲート電極

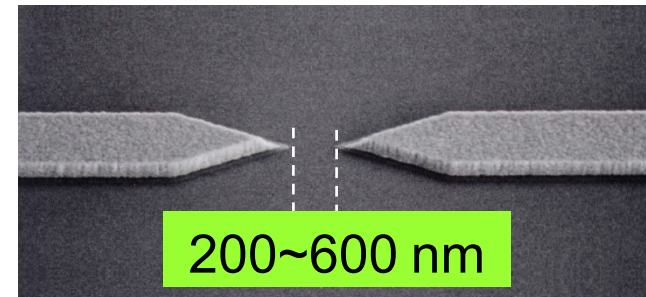
1. Splitゲート: ナノ領域の定義
2. アンテナゲート: 磁気共鳴用のラジオ波アンテナ
3. バックゲート: 二次元電子($\propto \nu$)を制御



: 振動磁場



電子顕微鏡像(SEM)



抵抗検出NMR

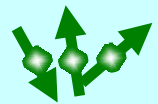
量子力学的重ね合わせ状態の生成

Skymionでスピン
を無偏極化

r.f. パルス幅 τ_p (ms)

B_1 (mT)

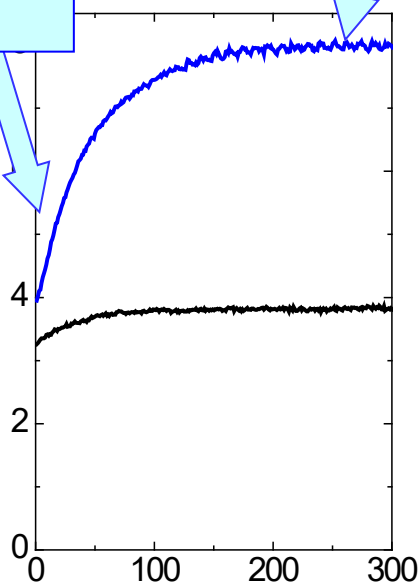
スピン
無偏極



スピン
偏極

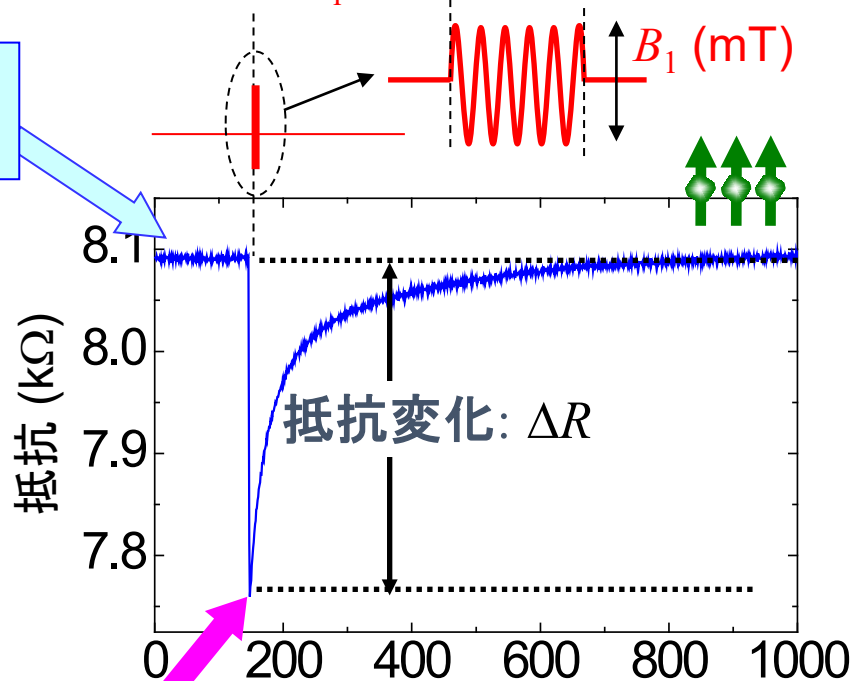


抵抗 (k Ω)



時間 (秒)

抵抗 (k Ω)



抵抗変化: ΔR

時間 (秒)

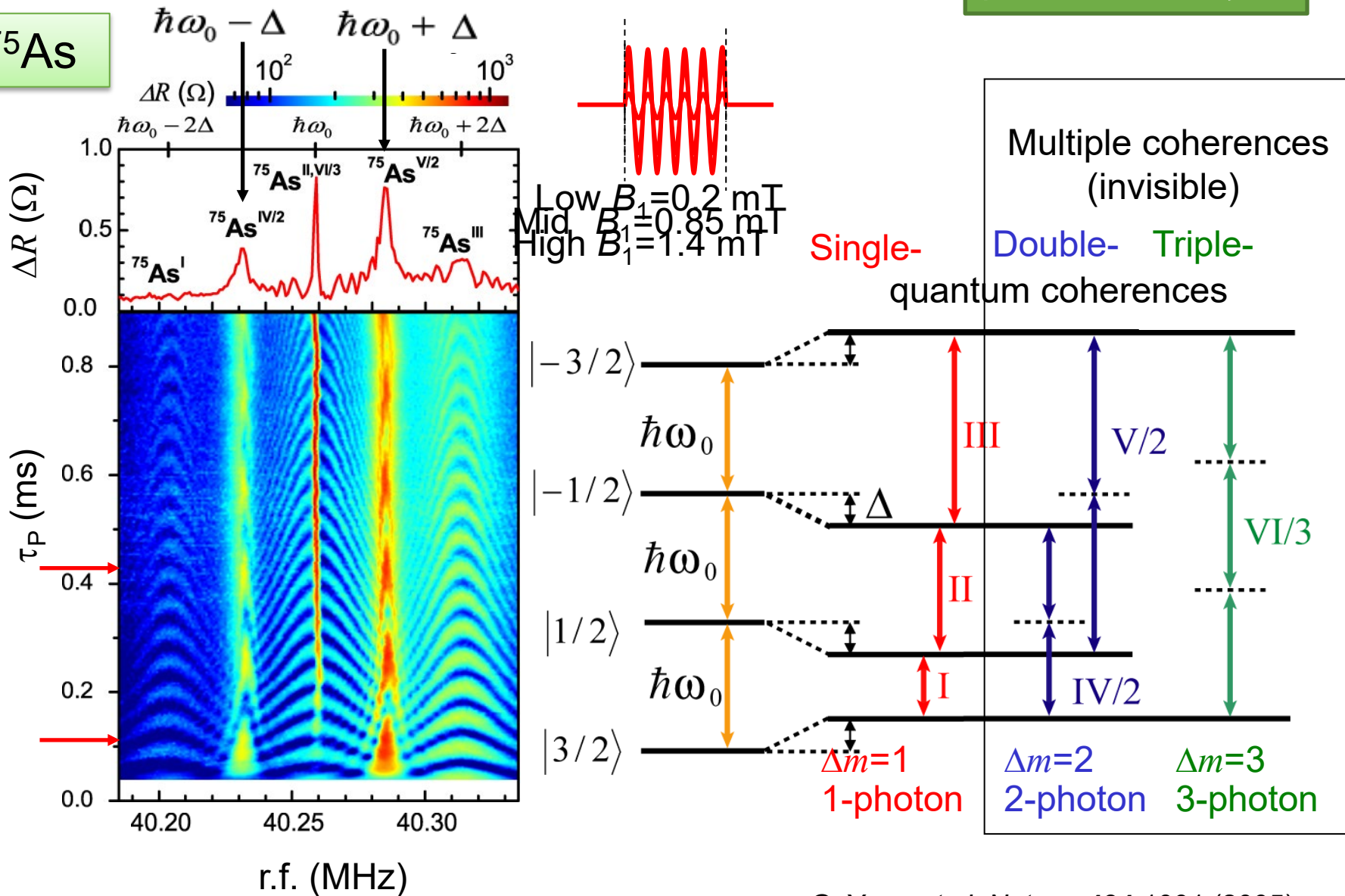
コヒーレント
状態



時間分解スペクトル

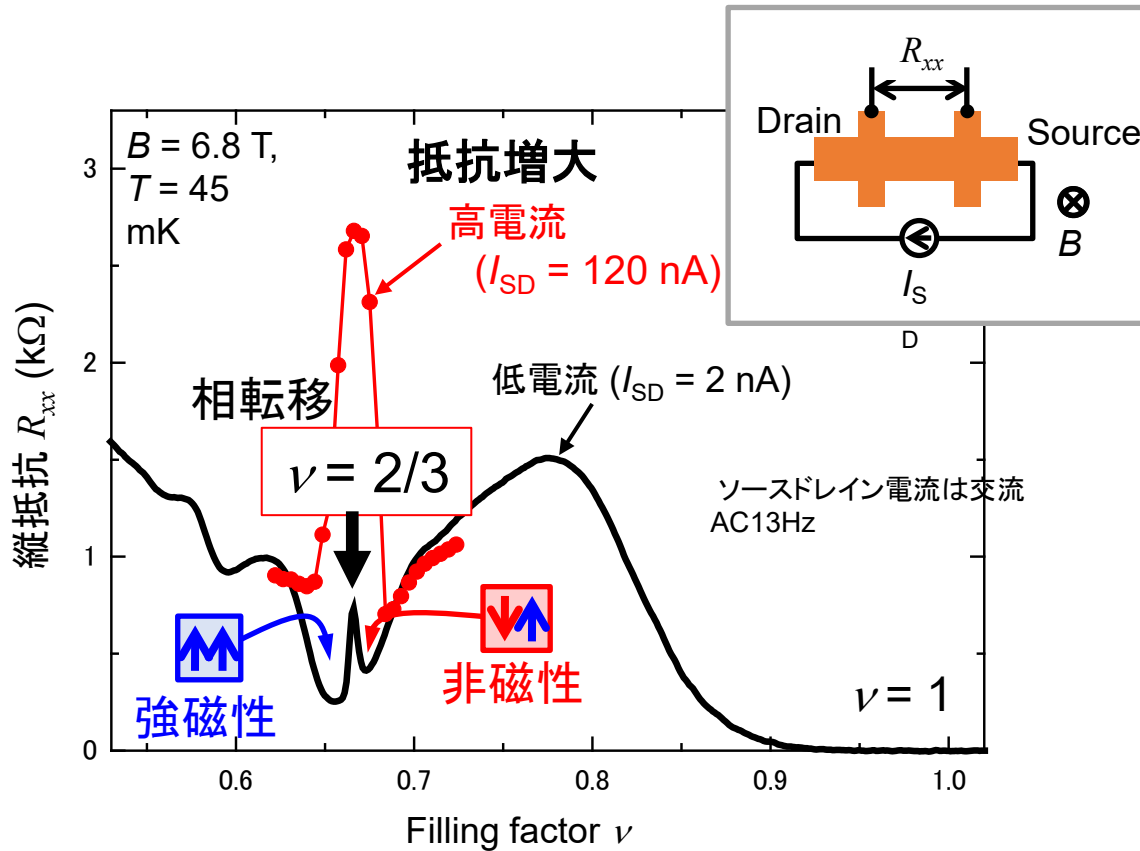
“qudit”
高次元量子計算?

^{75}As



$\nu = 2/3$ 非平衡状態での抵抗増大

Kronmuller et al. PRL (1998)

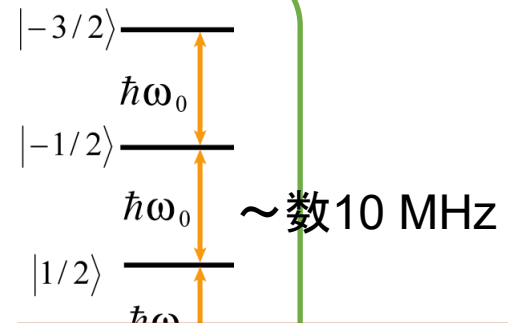


この巨大抵抗は核スピン偏極と関係があることが知られており、さまざまな研究で強力なツールとして使われてきた。

- Kronmuller et al. PRL (1998), (1999)
- J. H. Smet *et al.*, PRL(2001), Nature(2002).
- Kraus et al., PRL (2002).
- W. Desrat *et al.*, PRL (2002).
- Hashimoto *et al.* PRL (2002).
- G. Yusa *et al.* Nature (2005).
- N. Kumada *et al.*, Science (2006).
- L. Tiemann *et al.*, Science (2012),
- L. Tiemann *et al.*, Nature Phys (2013)
- K. Akiba et al., PRL (2015)
- K. Hashimoto et al., Nature com. (2018)
- etc...

ガリウム: ^{69}Ga , ^{71}Ga , ヒ素: ^{75}As

すべて核スピン $I = \frac{3}{2} \rightarrow 4$ 準位系



核スピンの偏極が、どこでどのように偏極するのか20年くらい謎だった。

$\nu \sim 2/3$ 付近の電流依存性

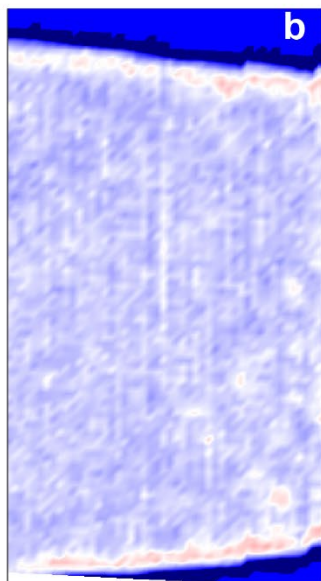
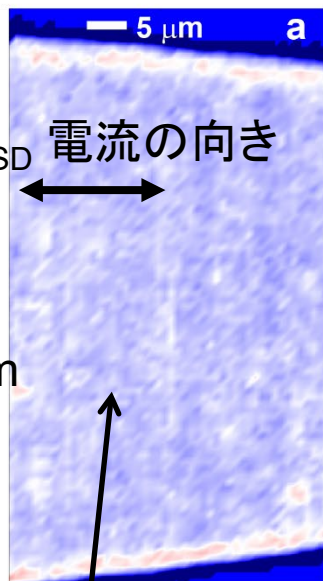
$38 \times 71\text{-}\mu\text{m}^2$ PL強度マップ ($B = 6.8\text{ T}$, $T = 60\text{ mK}$, $\nu = 0.660$)

低電流

大電流

$I = 0\text{ nA}$

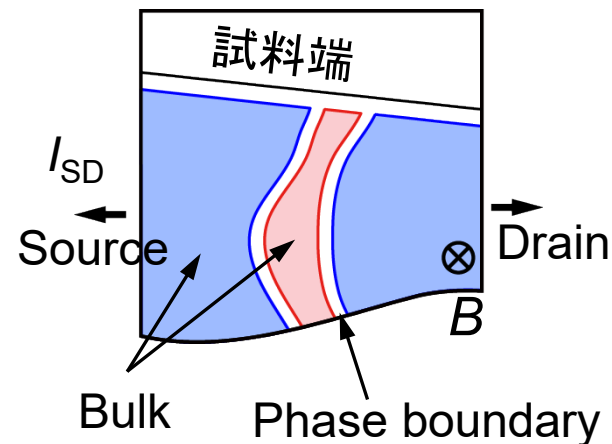
30 nA



Critical current I_{crit}

強磁性

非磁性



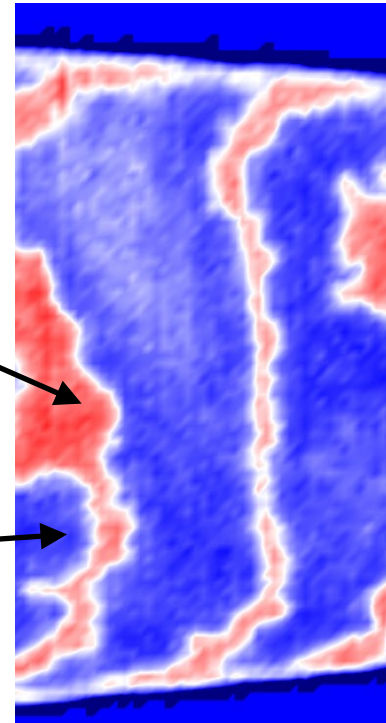
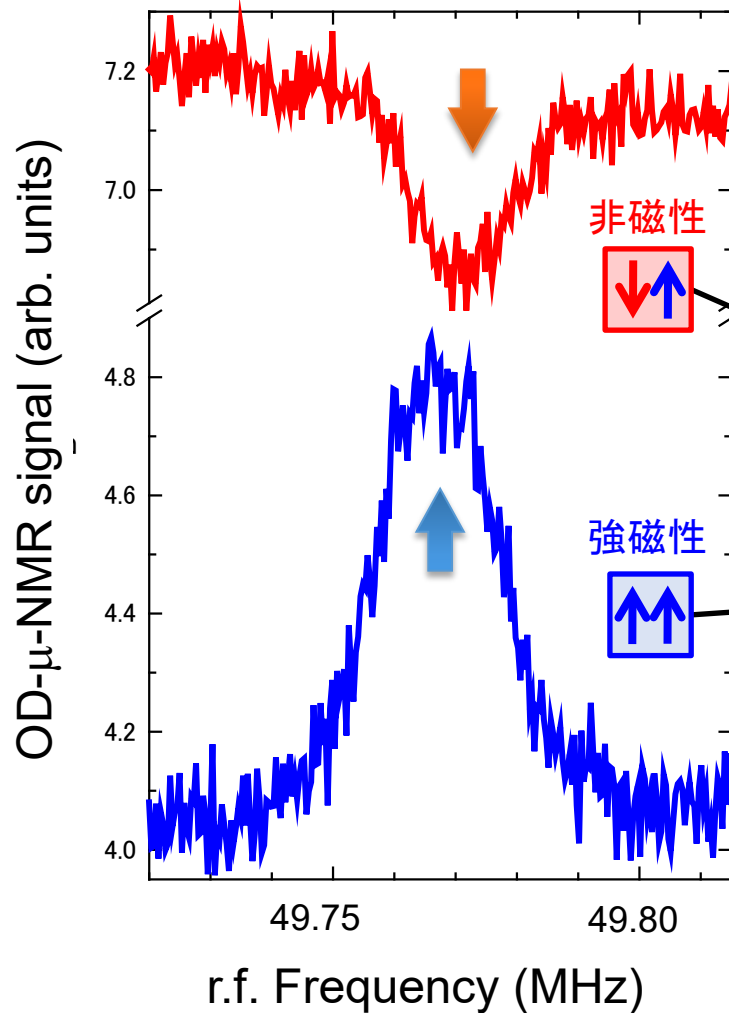
3 4 5 6
PL intensity
(arb. units.)

OD- μ -NMR spectrum

Resonance corresponding to ^{75}As

B = 6.8 T, ~ 80 mK

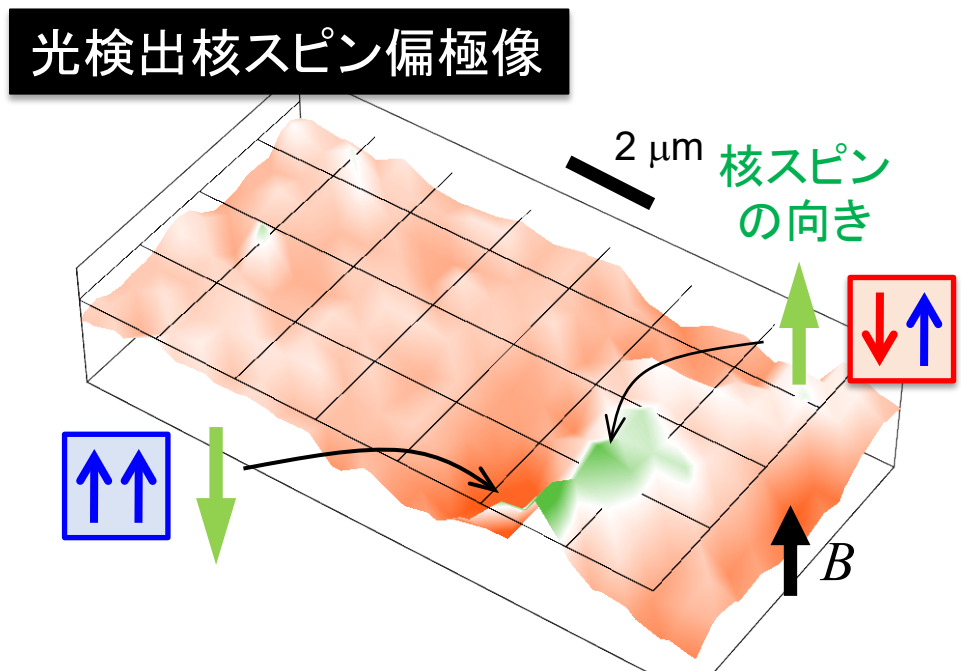
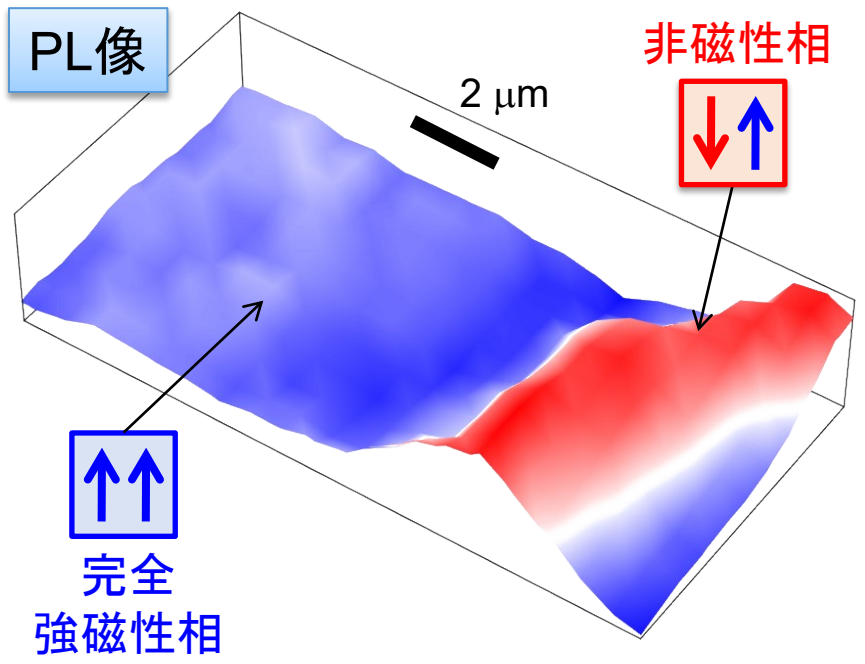
Resonant **dip** from **nonmagnetic** phase
Resonant **peak** from **ferromagnetic** phase



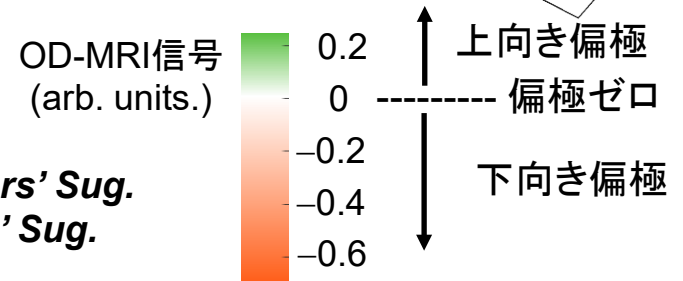
The nuclear spins are polarized on both sides of the phase boundaries, but with opposite polarities.

光検出核磁気共鳴(Optically Detected-NMR) 光検出磁気共鳴イメージング(OD-MRI)

超微細相互作用(電子スピンと核スピンの相互作用)を利用
 ^{75}As の核スピんに共鳴するRF電磁波を照射しながらPLを測定



イメージエリア: $15 \times 7.5 \mu\text{m}^2$
60 mK, 6.8 T



J. N. Moore *et al.* Phys. Rev. Lett. (2017). **Editors' Sug.**
J. N. Moore *et al.* Phys. Rev. B. (2016). **Editors' Sug.**



ここから量子宇宙の話

研究室レベルの実験で、トイモデルとして 量子宇宙を実現できるか？

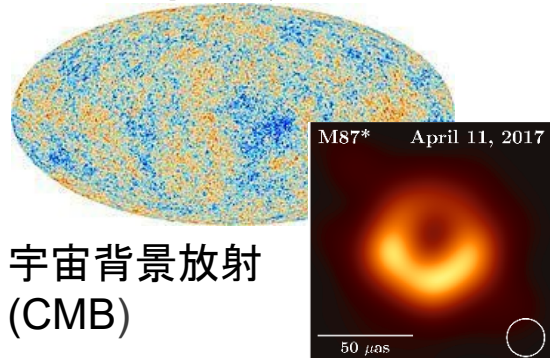
量子宇宙:

(量子力学と重力に支配される)
時間ゼロの極限的に小さな宇宙
量子ブラックホール

トイモデル:

トイ模型、おもちゃ、システムを設計
して、パラメーターを制御できる。

天文学的観測



宇宙背景放射
(CMB)

Event horizon
telescope (EHT)

高エネルギー加速器



LHC(Large Hadron
Collider)@CERN

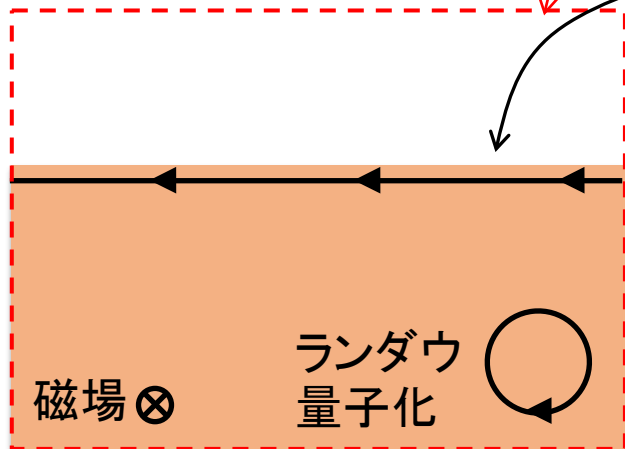
研究室レベルの実験



Our lab...

バルクとエッジ

試料端近傍を上から見た図

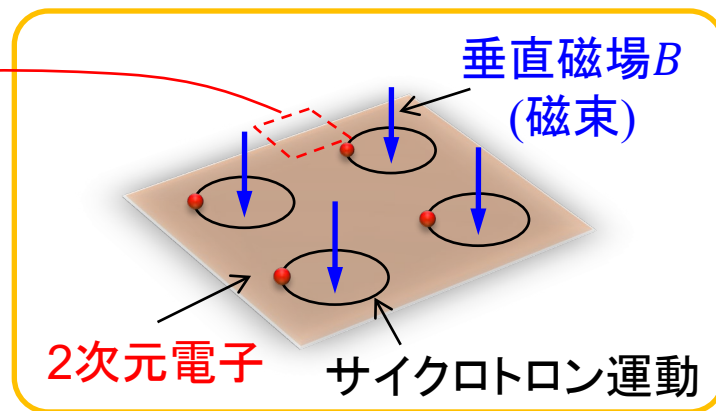


“試料端”では量子化条件が壊れる。

エッジ 金属的

試料端から離れた場所

バルク 絶縁体



ラuttinger液体として記述可

• 分散関係の2階微分がゼロ → 質量ゼロ (カイラル)

→ 1次元カイラルmassless boson (ゼロ質量場)

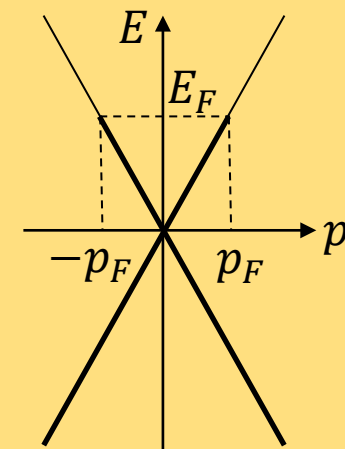
場の理論では、

「質量ゼロのボソンは**光速で真空を伝搬**する」

エッジの励起は、真空を伝搬する光と等価

実験的にはギャップのない励起が**減衰せずに長距離を伝搬**

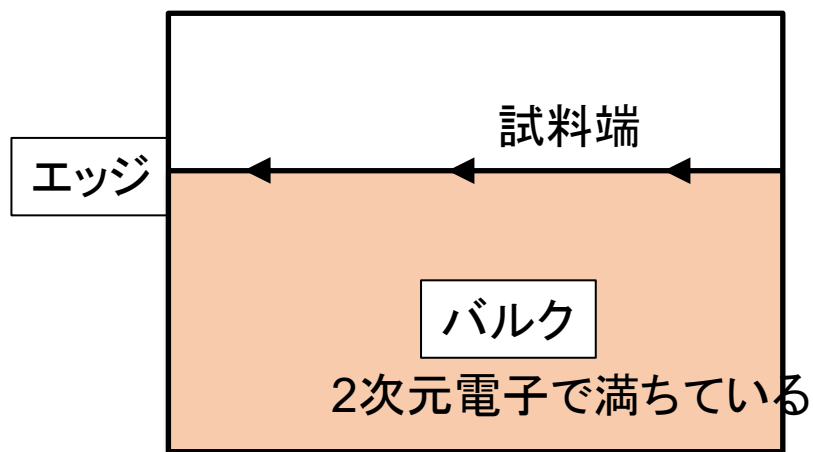
ラuttinger模型の分散関係



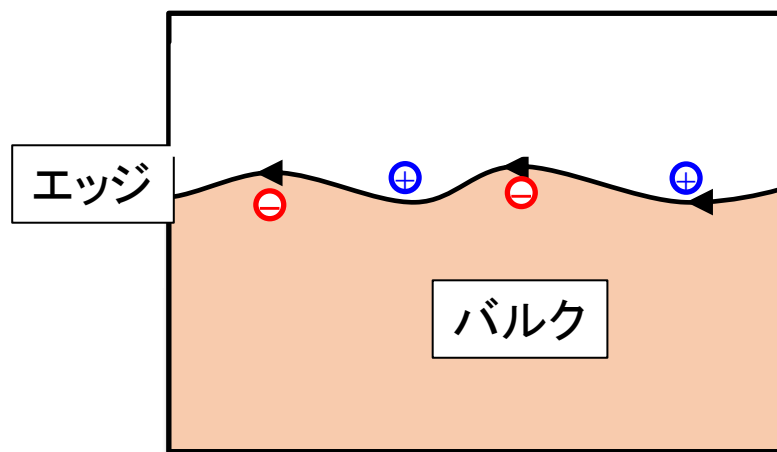
Luttinger (1963)

エッジの基底状態と励起状態(古典的描像)

基底状態 (古典)



励起状態(古典)



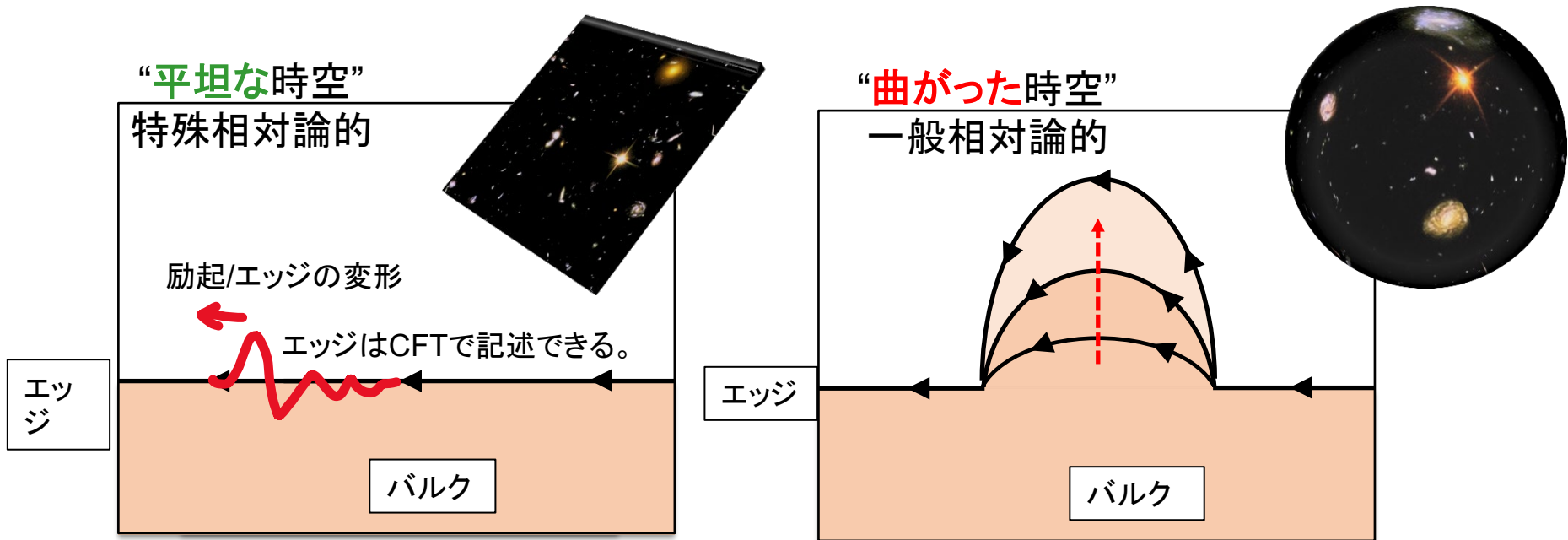
ギャップがないので、連続変形
電荷密度波/Edge
magnetoplasmon

量子ホールエッジにおける膨張宇宙

1次元のエッジを時間的に変形させると、エッジは、
(1+1)=2次元の共形場理論で記述できる

時間 空間

→ **2次元宇宙**のトイモデル



M. Hotta et al., Phys. Rev. D 105, 105009 (2022).

M. Hotta et. al., Phys. Rev. A 89, 012311 (2014).

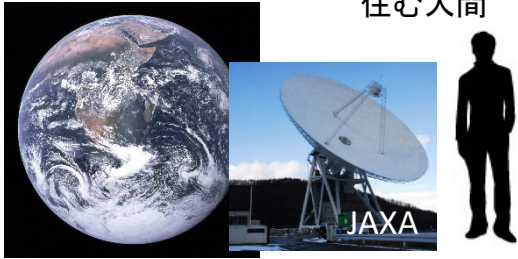
遊佐、堀田 応用物理学会誌(2023)

「量子ホール系に量子宇宙を再現する」

膨張宇宙を模したエッジ

地球での観測

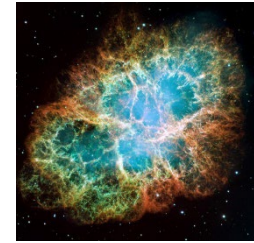
3次元空間に住む人間



赤方偏移



天体が遠ざかって見える



遠ざかる天体
(標準光源)



V : 地球から見て遠ざかる速度

下流での観測

オシロスコープ

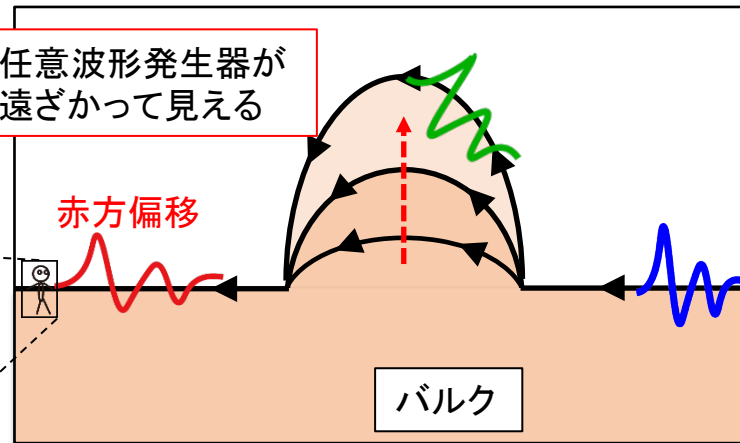


1次元空間に住む小人



任意波形発生器が遠ざかって見える

赤方偏移



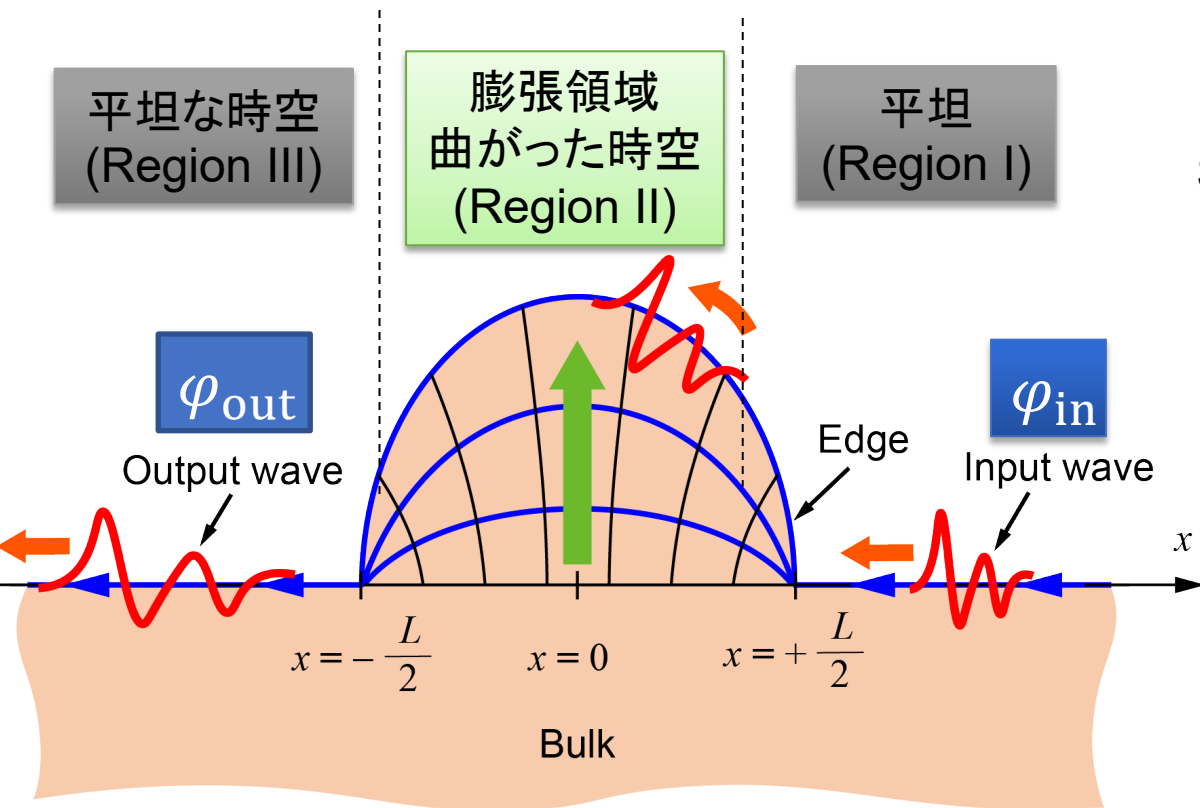
バルク

上流での励起

任意波形発生器



膨張宇宙を模したエッジ



Spacetime metric

$$ds^2 = -v^2 d\tau^2 + a(\tau) dx^2$$

v : “光”速:

(電荷密度波の速度)

$a(\tau)$: scale factor

τ : Proper time

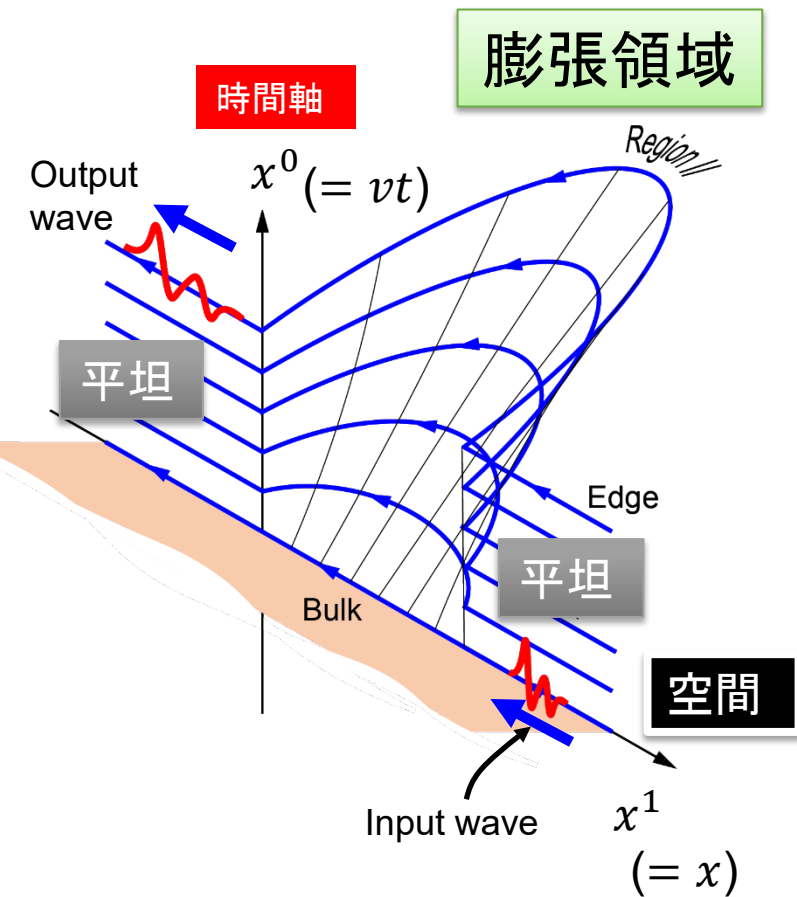
L : length of expanding region



M. Hotta et al., Phys. Rev. D 105, 105009 (2022).

遊佐、堀田 応用物理学会誌(2023)「量子ホール系に量子宇宙を再現する」

QH Systems in a Cosmology Language



R : Curvature
 $= -4\lambda^2$ (AdS)
 or $4\lambda^2$ (AdS)

$$ds^2 = -v^2 d\tau^2 + a(\tau) dx^2$$



Conformally flat spacetime metric

$$ds^2 = -\exp(2\Theta(x^+, x^-)) dx^+ dx^-$$



$\exp(2\Theta(x^+, x^-))$: Conformal factor
 x^+, x^- : Light cone coordinates

Smoothly connect Regions I and II for x_{in}^+ and Regions II and III for x_{out}^+

Chiral condition
 $\frac{\partial}{\partial x^-} \varphi = 0$
 φ : Field



The expanding edge can be regarded as an FLRW (Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker) simulator in a 2D dilaton gravity model including a JT model (Jackiw–Teitelboim)

FLRW metric

$$\text{AdS } ds^2 = -v^2 d\tau^2 + \cos^2(\sqrt{2}\lambda vt) dx^2$$

$$\text{de Sitter } ds^2 = -v^2 d\tau^2 + \cosh^2(\sqrt{2}\lambda vt) dx^2$$

QH Systems in a Cosmology Language

$$\varphi_{\text{out}}(x_{\text{out}}^+) = \varphi_{\text{in}}(F(x_{\text{out}}^+))$$

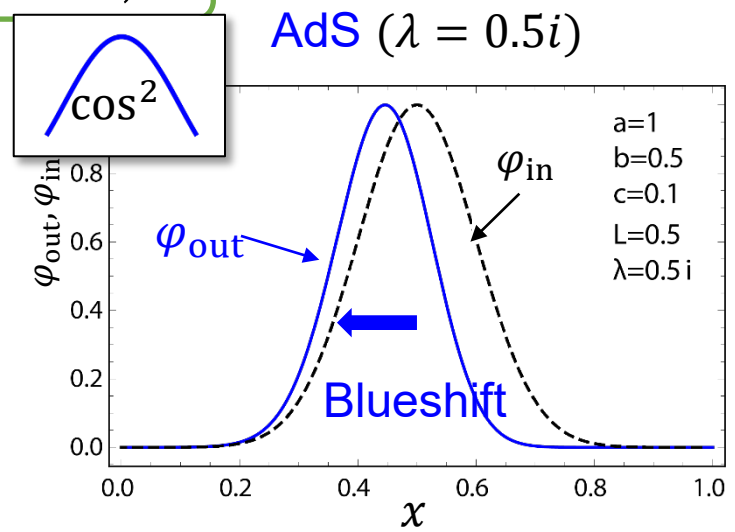
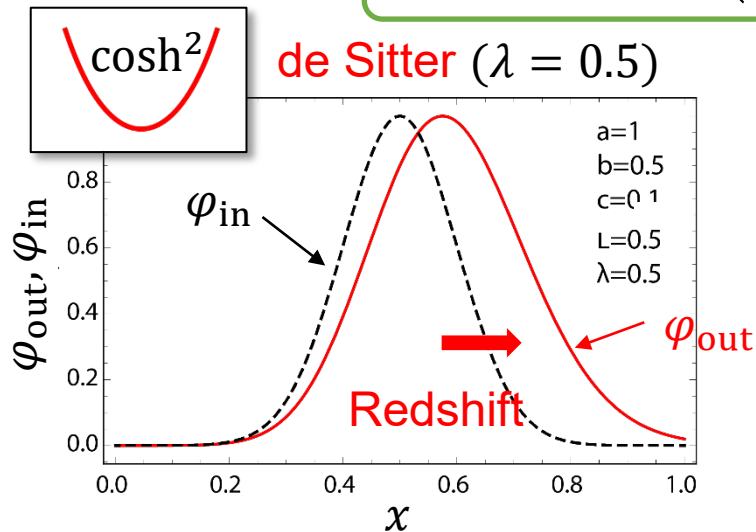
$$F(x) = F_{\text{in}}^{-1}(F_{\text{out}}(x))$$

$$F_{\text{in}}^{-1}(x) = \frac{1}{4\sqrt{2}\lambda} \ln \left(\frac{1 + \sin(\sqrt{2}\lambda(2x - \frac{L}{2}))}{1 - \sin(\sqrt{2}\lambda(2x - \frac{L}{2}))} \times \frac{1 + \sin(\frac{\lambda L}{\sqrt{2}})}{1 - \sin(\frac{\lambda L}{\sqrt{2}})} \right)$$

$$F_{\text{out}}(X) = -\frac{L}{4} + \frac{1}{2\sqrt{2}\lambda} \arcsin \frac{\left(1 + \sin(\frac{\lambda L}{\sqrt{2}})\right) e^{4\sqrt{2}\lambda X} - \left(1 - \sin(\frac{\lambda L}{\sqrt{2}})\right)}{\left(1 + \sin(\frac{\lambda L}{\sqrt{2}})\right) e^{4\sqrt{2}\lambda X} + \left(1 - \sin(\frac{\lambda L}{\sqrt{2}})\right)}$$

Input wave: Gaussian

$$\varphi_{\text{in}}(x) := a \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right)$$



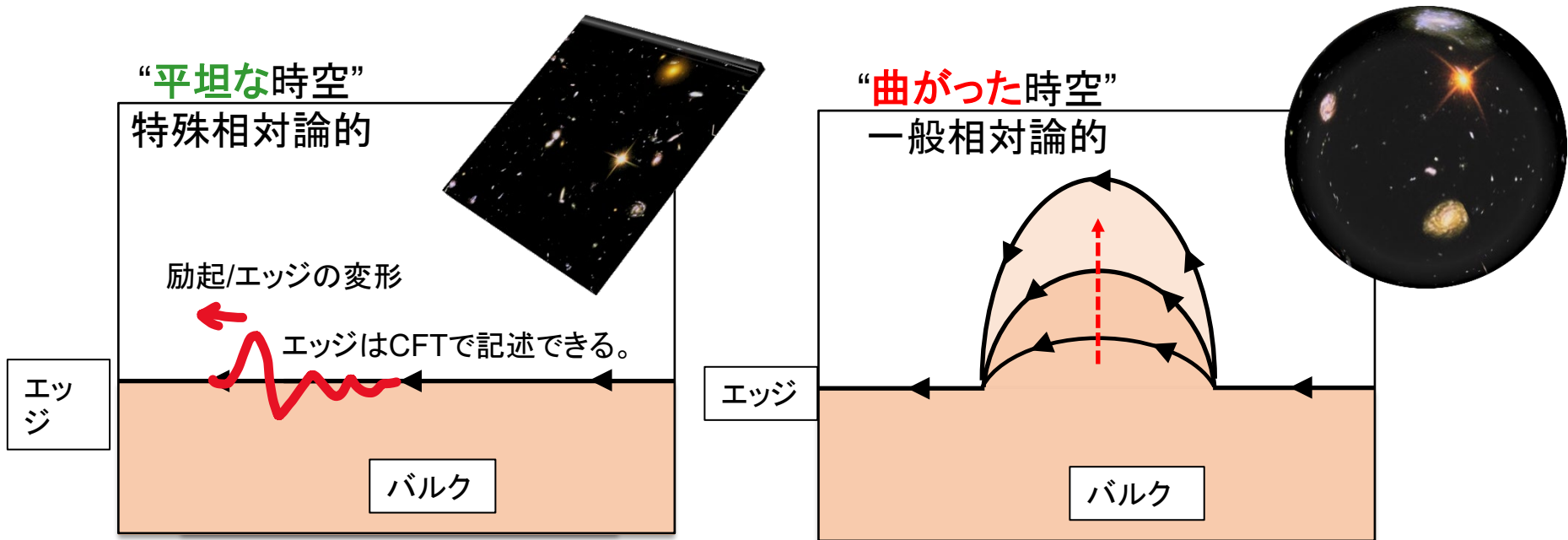
x denotes x_{in}^+ and x_{out}^+ for φ_{in} and φ_{out} , respectively.

量子ホールエッジにおける膨張宇宙

1次元のエッジを時間的に変形させると、エッジは、
(1+1)=2次元の共形場理論で記述できる

時間 空間

→ **2次元宇宙**のトイモデル

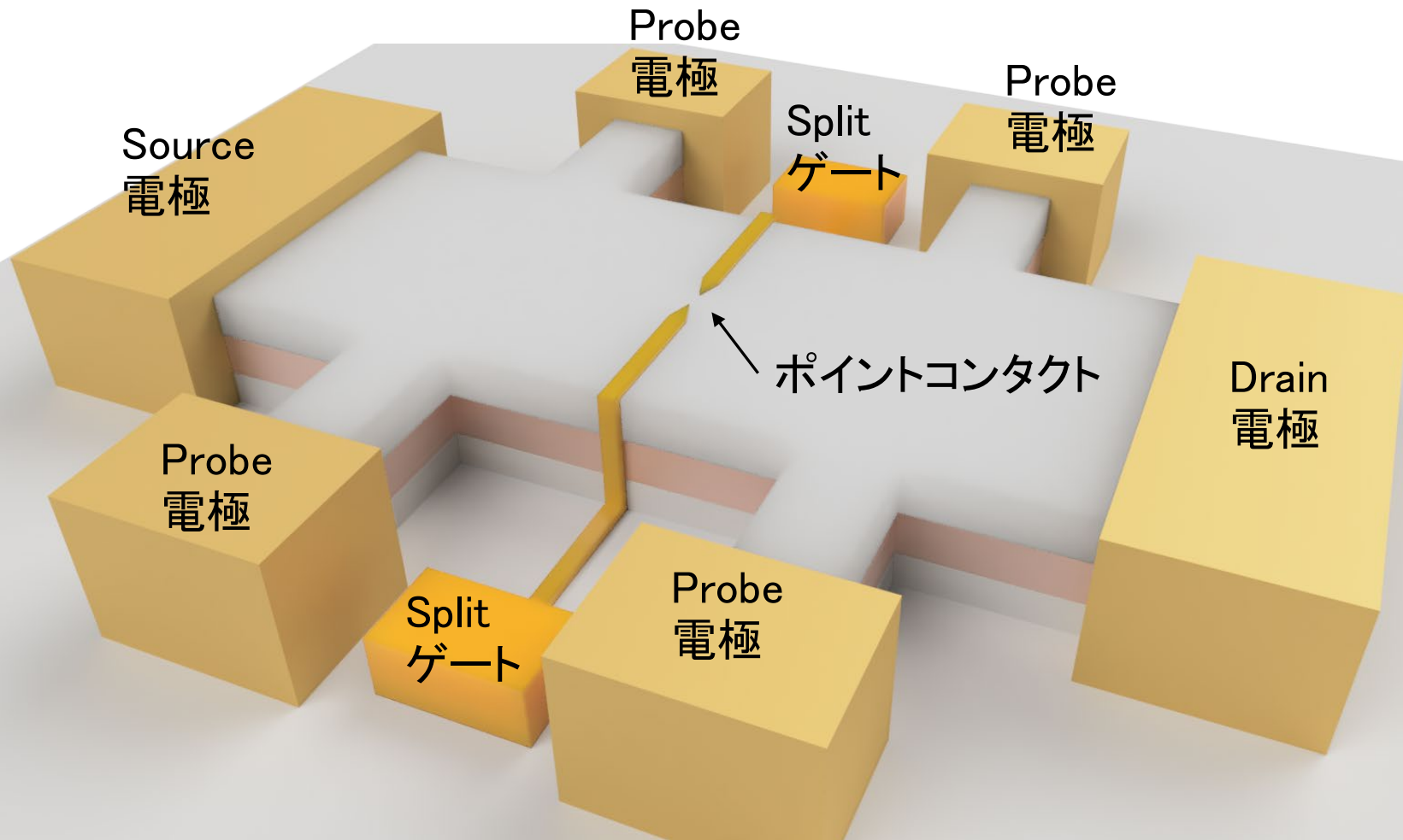


M. Hotta et al., Phys. Rev. D 105, 105009 (2022).

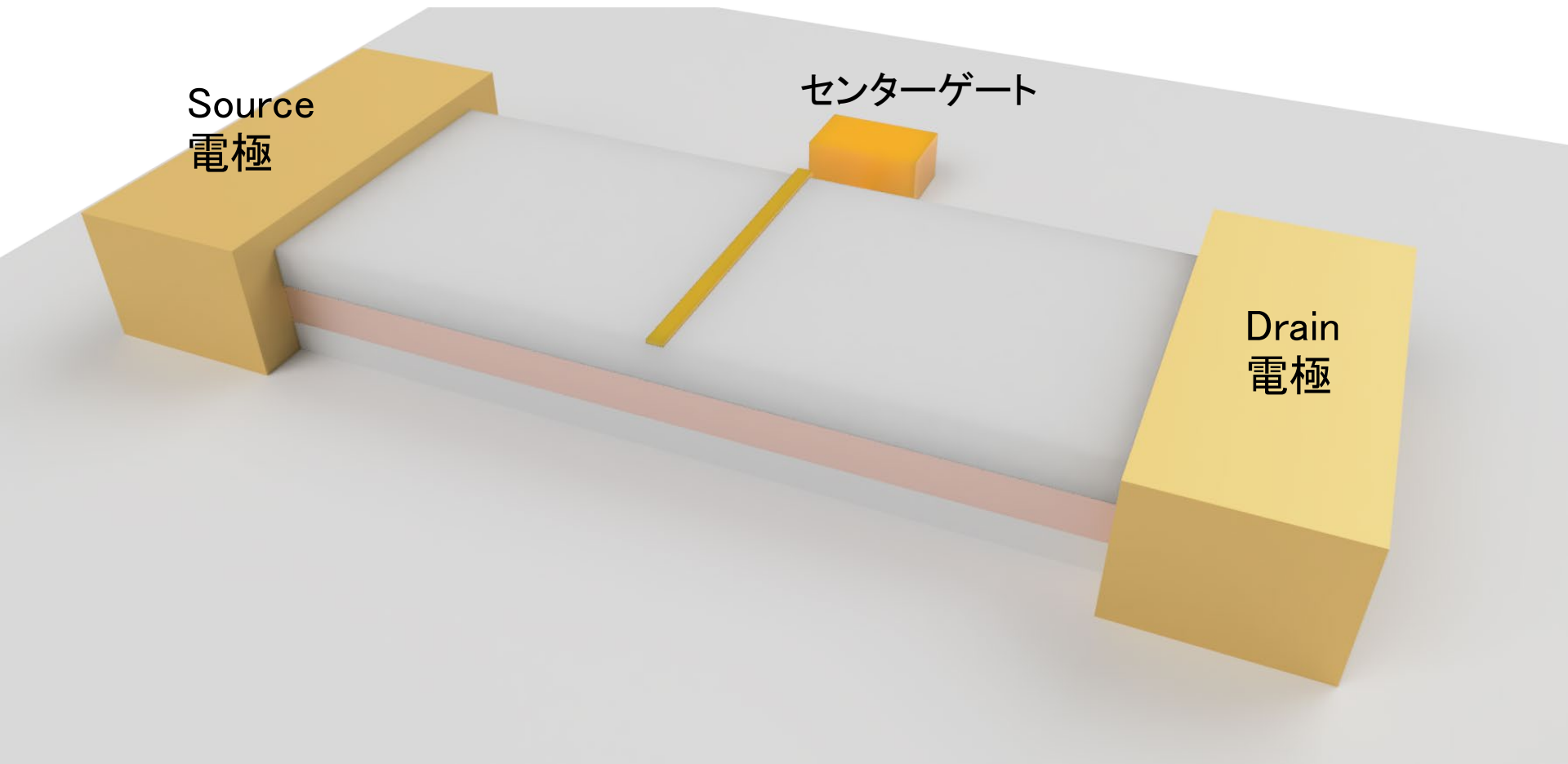
M. Hotta et. al., Phys. Rev. A 89, 012311 (2014).

“平坦な時空”

エッジの励起状態の伝搬測定

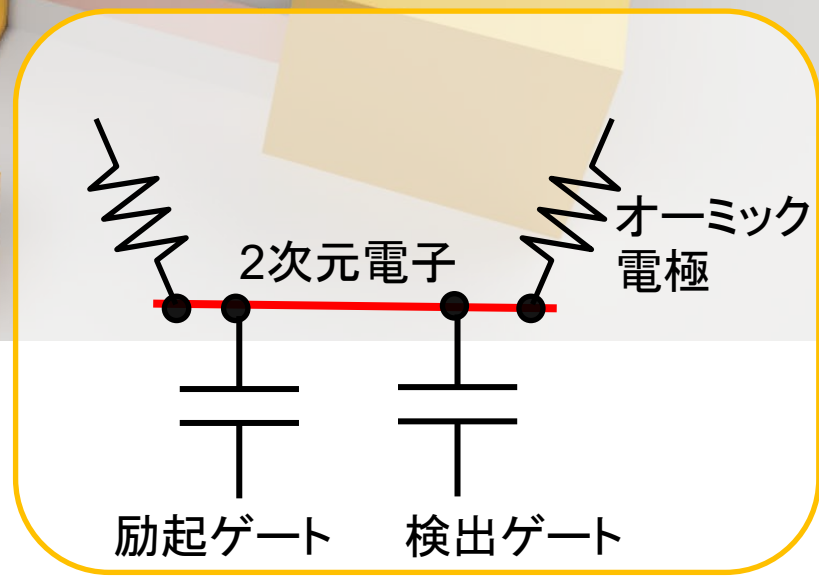
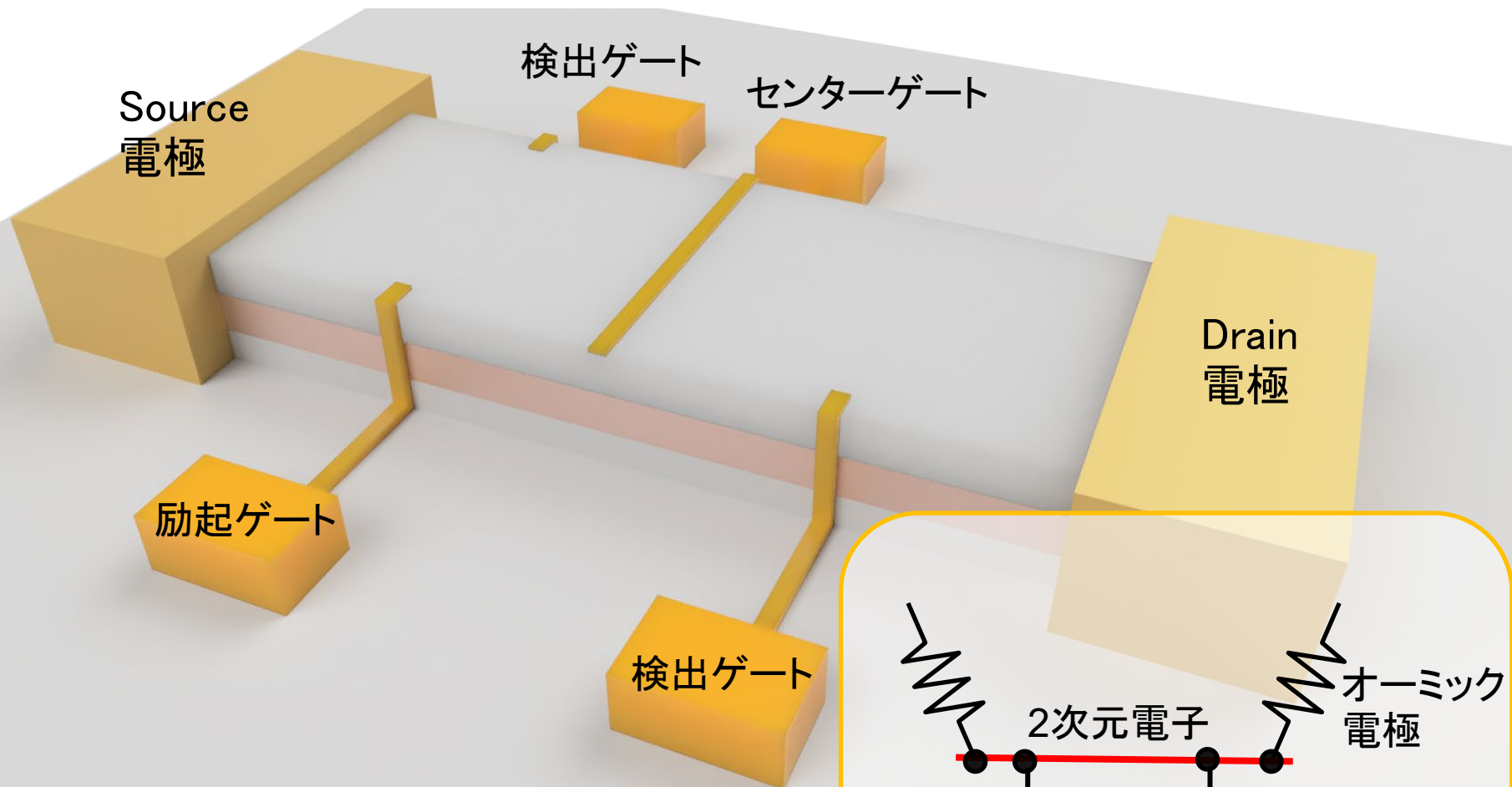


“平坦な時空” エッジの励起状態の伝搬測定

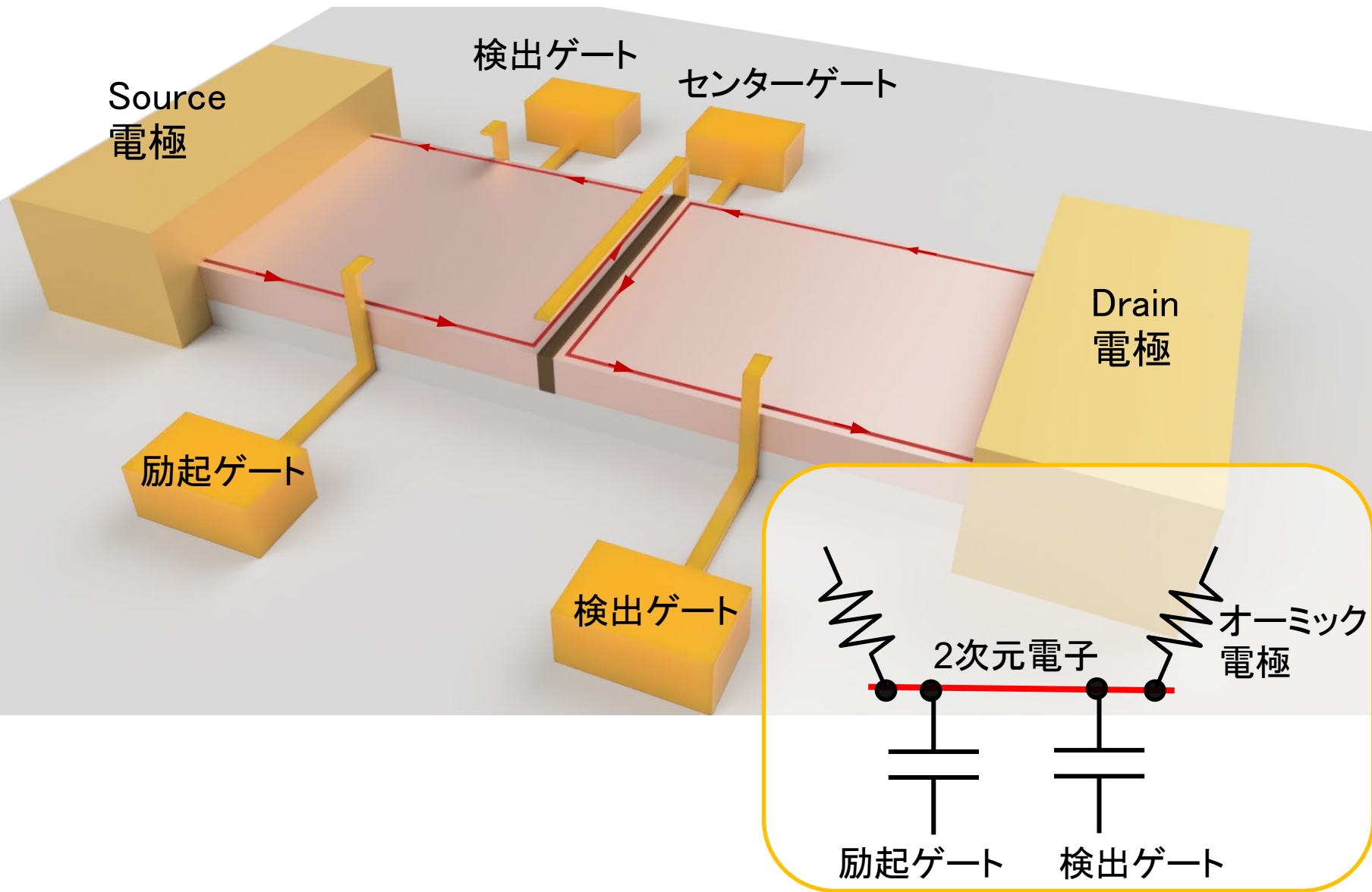


“平坦な時空”

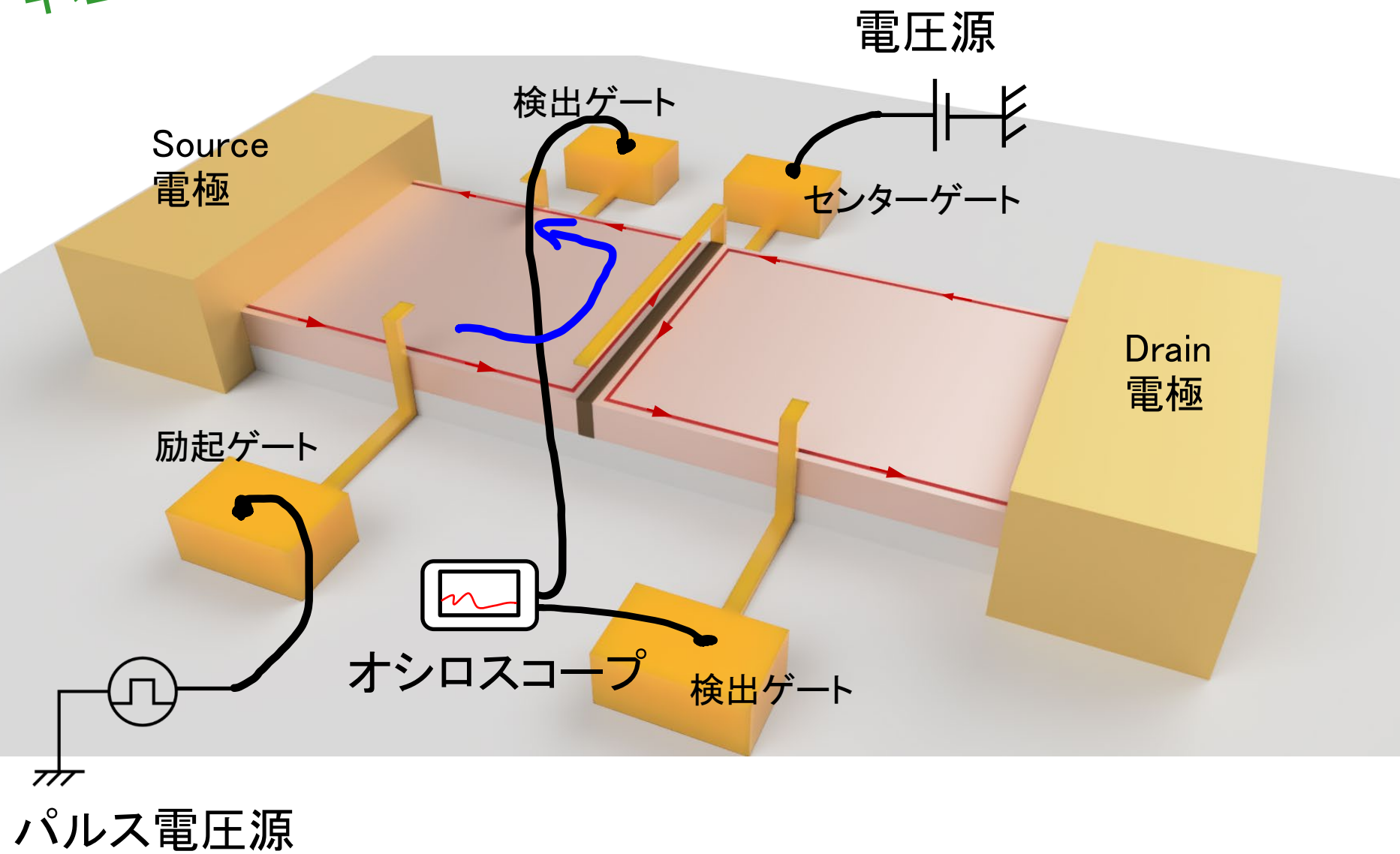
エッジの励起状態の伝搬測定



“平坦な時空” エッジの励起状態の伝搬測定

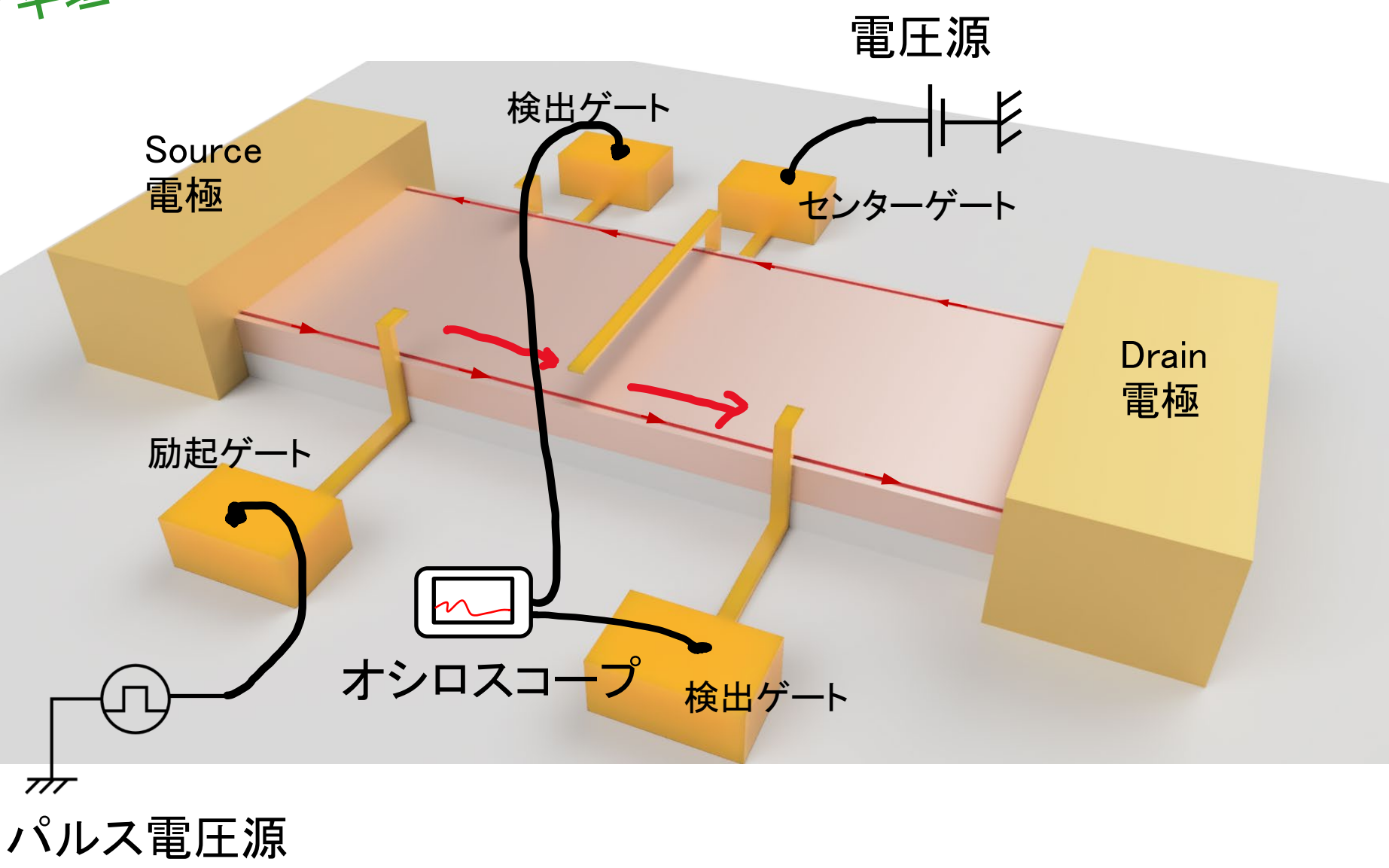


“平坦な時空” エッジの励起状態の伝搬測定



“平坦な時空”

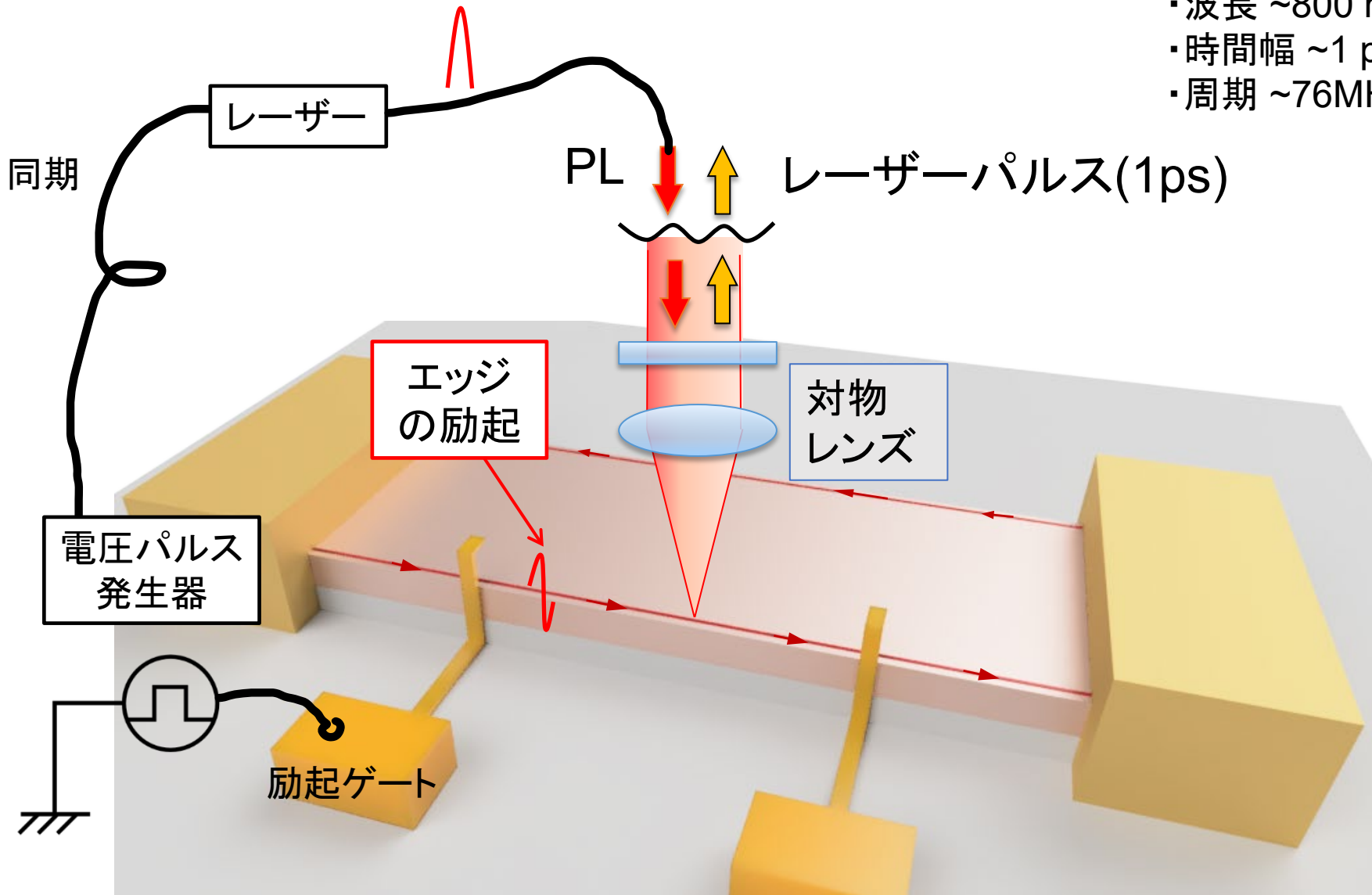
エッジの励起状態の伝搬測定



時間・空間
分解

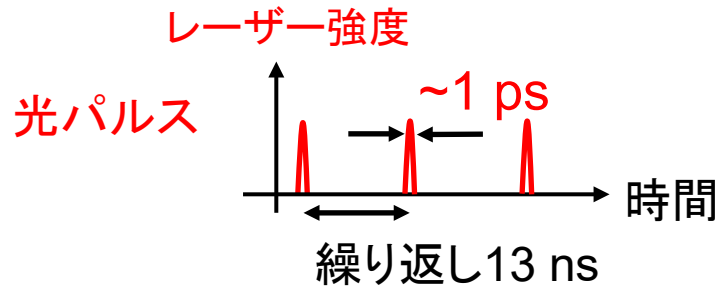
ストロボスコープ共焦点顕微鏡

- ・波長 ~ 800 nm
- ・時間幅 ~ 1 ps
- ・周期 ~ 76 MHz



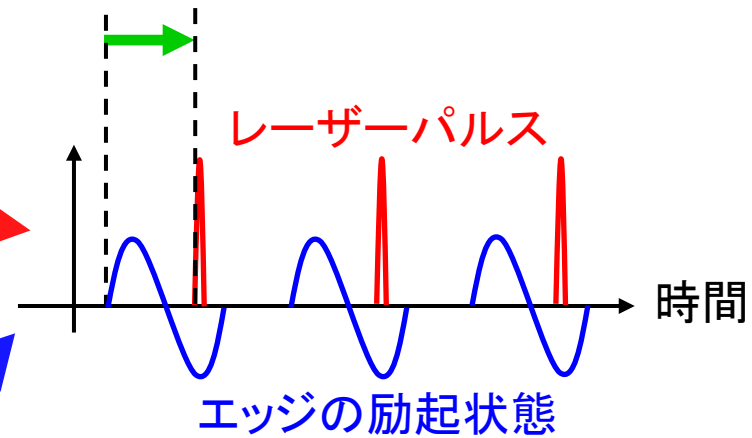
ストロボスコープ (二つのパルスの同期)

光学系: 励起子の励起

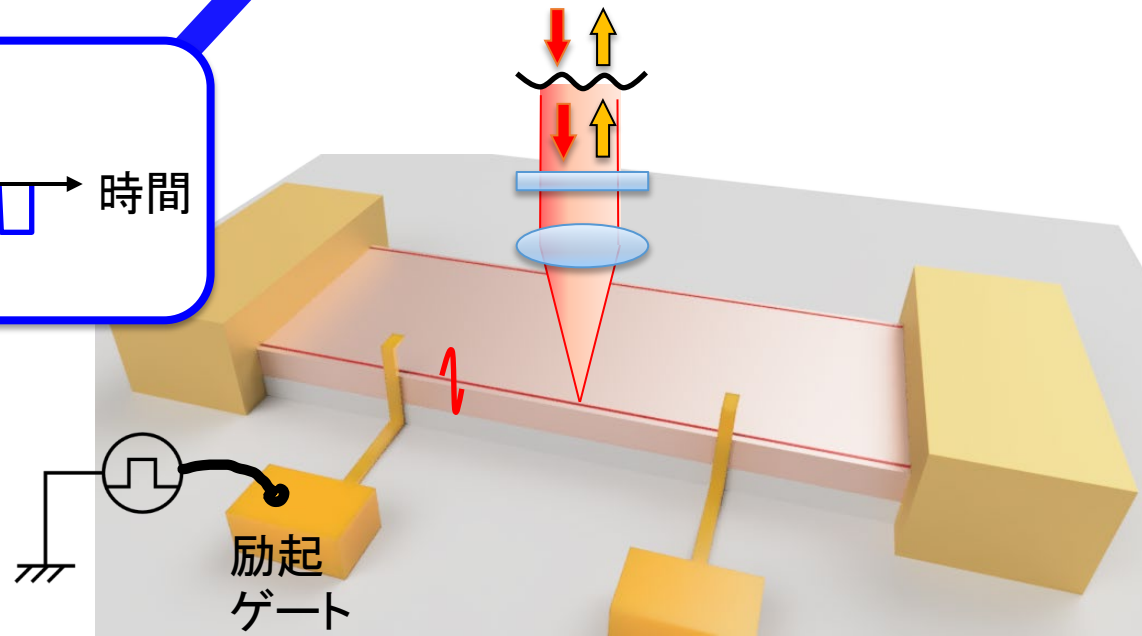
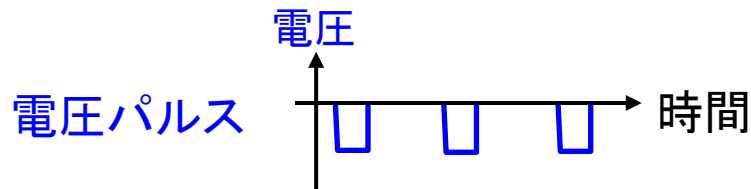


エッジの励起状態に対する
レーザーパルスの時間差

Delay time Δt



電子系: エッジの励起



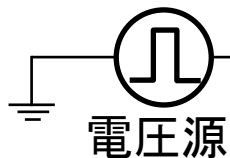
分数量子ホールエッジの伝搬(動画)

$$\nu = 2/3$$

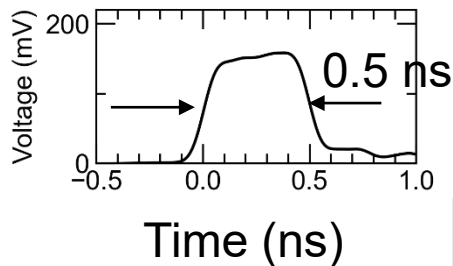
温度: ~50 mK
磁場: 12 T

光学顕微鏡像

励起ゲート



励起ゲートに印可された電圧波形

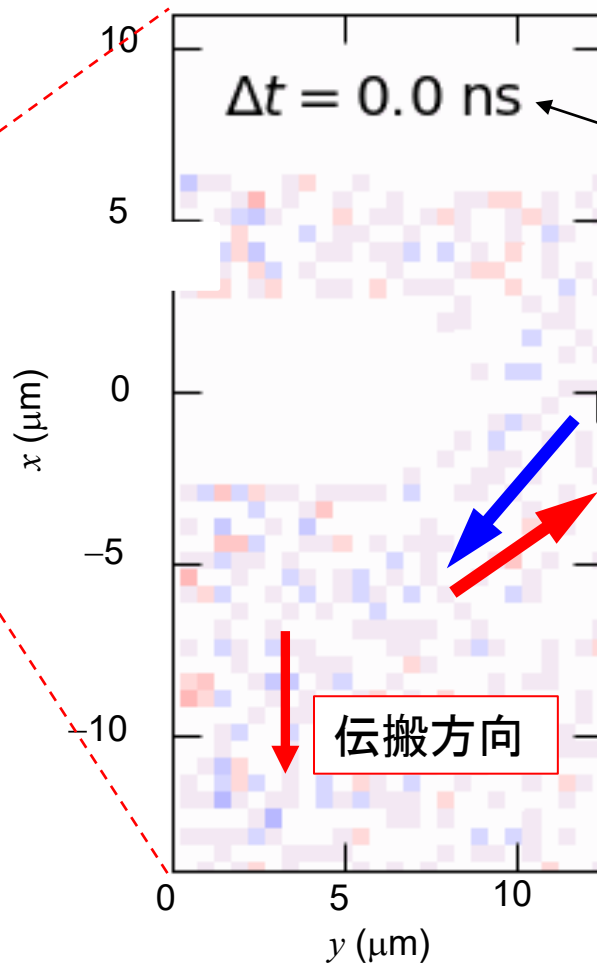


試料端

20 μm

バルク

走査型ストロボスコープ顕微鏡像



~実時間
(電圧パルスとレーザーパルスの時間差)

ピコ秒パルスレーザー
発光を測定

$v \sim 10^5 \text{ m/s}$



Kamiyama et al., Phys. Rev. Research 4, L012040 (2022).

ゲート付近のストロボPL測定

$$\nu = 1/3$$

温度: 60mK, 磁場11.5 T

$\Delta t = -1.2$ ns

0.0 ns

0.2 ns

0.6 ns

2.0 ns

5 μm —

$I_{\text{PL,N}}$ (arb. units)

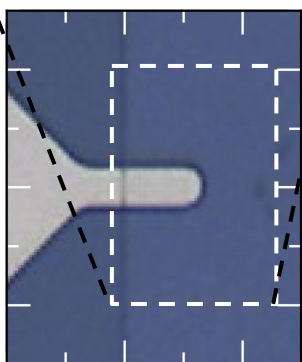
0.8 1 1.2



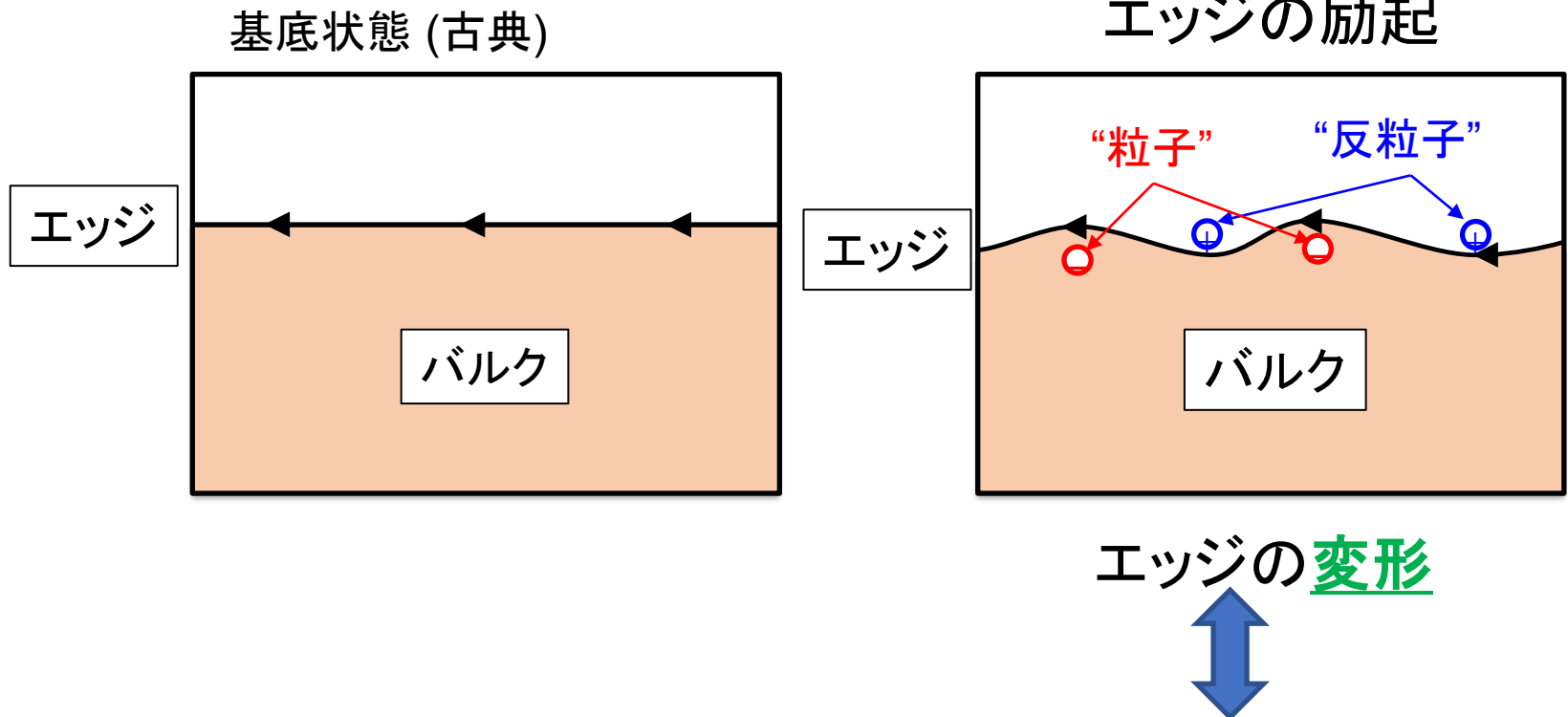
時間分解能:

PL測定: ~ 300 ps Kamiyama et al., Phys. Rev. Research (2022).

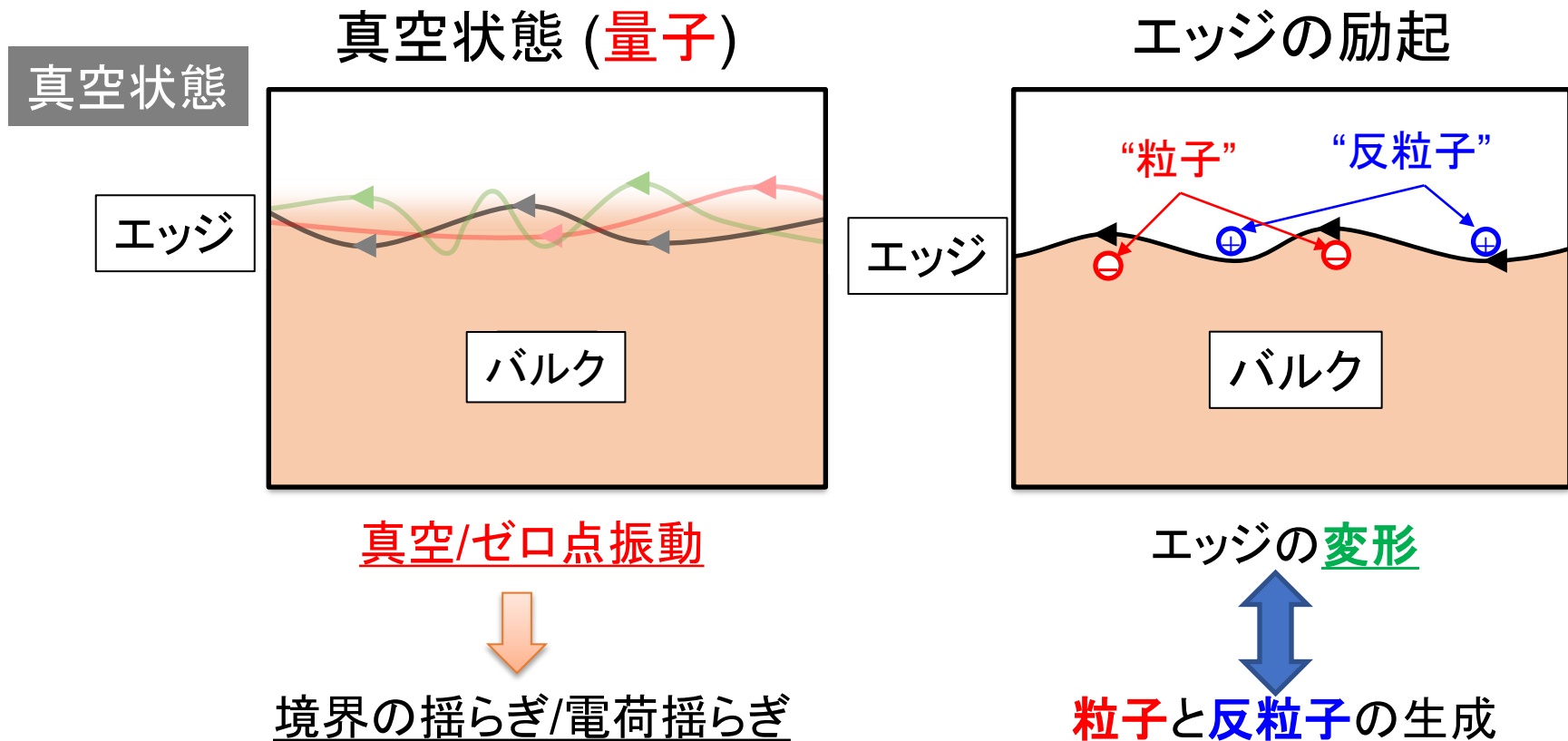
反射測定: ~ 1 ps Kamiyama et al., Appl. Phys. Lett. (2023).



エッジの基底状態と励起状態(古典的描像)




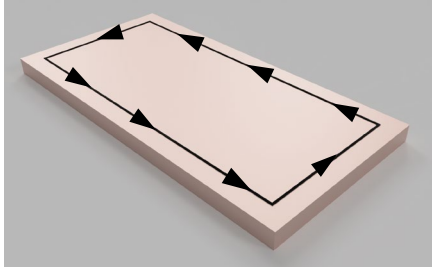
エッジの基底状態と励起状態(量子的描像)

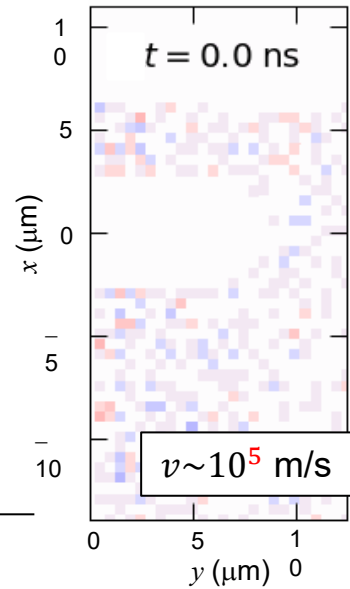


量子エネルギーテレポーテーション
を使うと測定可能

G. Yusa et al. Phys. Rev. A (2011).

Physical Universe vs “QH Universe”

	<p>Physical Universe</p> 	<p>“QH Universe”</p> 
<p>Dimension</p>	<p>3+1</p> <p>Difficult to solve...</p>	<p>1+1</p> <p>2D CFT is special and sometimes exactly solvable using Virasoro algebra.</p>
<p>Speed of “light”</p>	<p>$c \sim 3 \times 10^8$ m/s</p>	<p>Speed of charge density wave</p> <p>$v \sim 10^{5-6}$ m/s</p> <p>This is good for the experiment.</p>

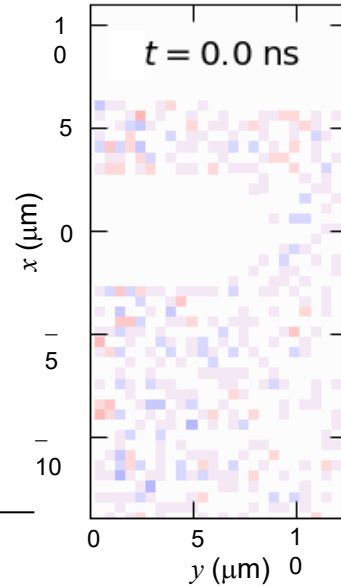
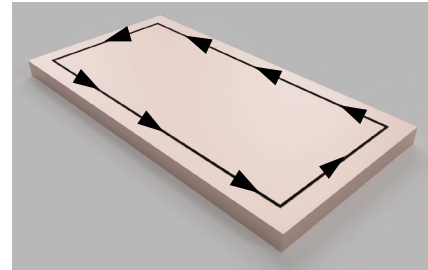


Physical universe vs “QH Universe”

Physical Universe



“QH Universe”

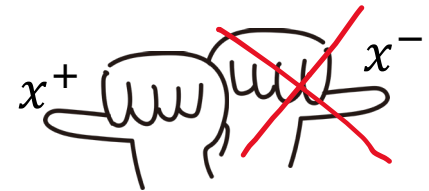


Chirality

“non-chiral”

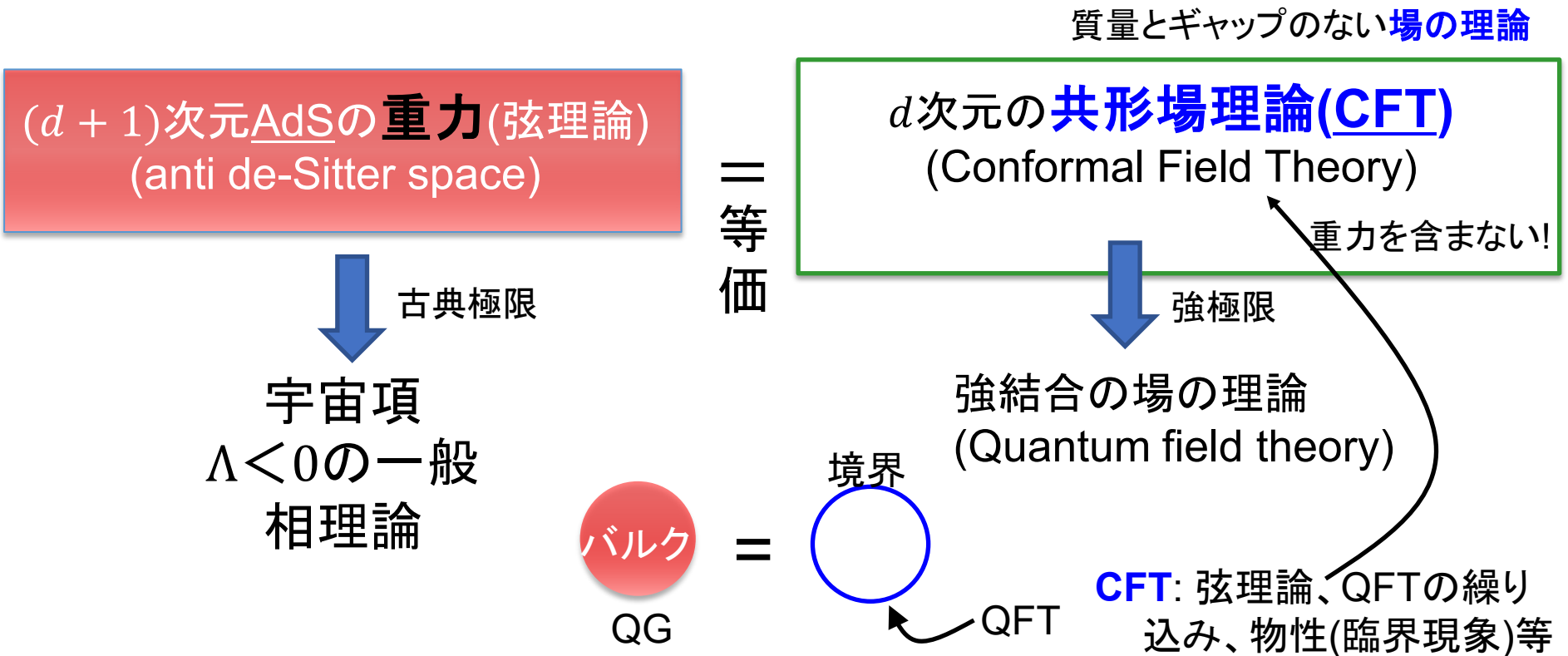
Chiral

- Chirality can make the theory simpler.
- Maybe ...



量子重力

AdS/CFT対応 (Maldacena 97) より一般的にはホログラフィック原理



ChiralityとExtremeブラックホール



D01班
西岡 辰磨

arXiv.org > hep-th > arXiv:0809.4266

High Energy Physics - Theory

[Submitted on 25 Sep 2008]

The Kerr/CFT Correspondence

Monica Guica, Thomas Hartman, Wei Song, Andrew Strominger

Quantum gravity in the region very near the horizon of an extreme Kerr black hole (whose angular momentum and mass are related by $J=GM^2$) is considered. It is shown that consistent boundary conditions exist and the asymptotic symmetry generators form one copy of the Virasoro algebra with central charge $c_L=1$. This implies that the near-horizon quantum states can be identified with those of (a chiral half of) a two-dimensional CFT.

arXiv.org > hep-th > arXiv:0811.4393

High Energy Physics - Theory

[Submitted on 26 Nov 2008 (v1), last revised 1 Apr 2009 (this version, v2)]

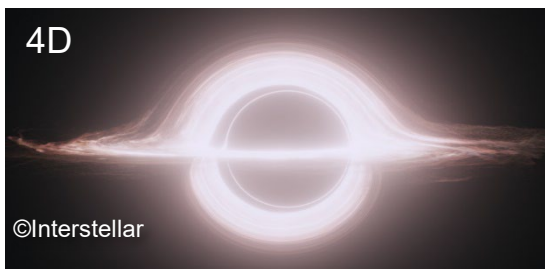
CFT Duals for Extreme Black Holes

Thomas Hartman, Keiju Murata, Tatzuma Nishioka, Andrew Strominger

It is argued that the general four-dimensional extremal Kerr-Newman-AdS-dS black hole is holographically dual to a (chiral half of a) two-dimensional CFT, generalizing an argument given recently for the special case of extremal Kerr. Specifically, the asymptotic symmetries of the near-horizon region of the general extremal black hole are shown to be generated by a Virasoro algebra. Semiclassical formulae are derived for the central charge.

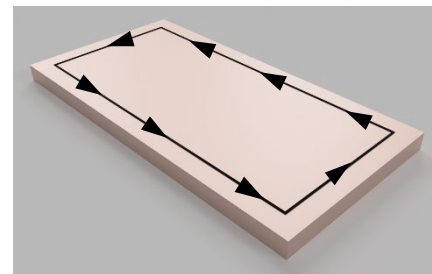
一般的な四次元Kerr-Newman-AdS-dS BH
が2D chiral CFT(の片方)とホログラフィック的
に双対である。

4次元BH

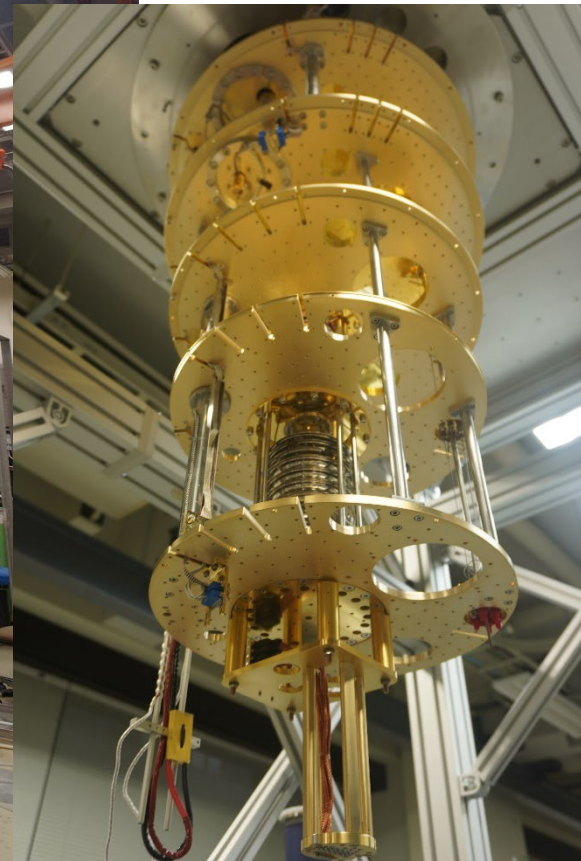


=
双対?

chiral 2D CFT量子ホール



希釈冷凍機 5mK, 12T



まとめ

抵抗、光による
核スピン検出

$$I = \frac{3}{2}$$

励起子を使った
量子ホール系の可視化
(光学系)

量子ホール系で
創る量子宇宙

光検出核スピン偏極像

